

Tecnologias de Ligação de Espumas Metálicas

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

António Paulo Santos da Costa

Orientadora: Professora Doutora Rosa Miranda
Co-Orientador: Professor Doutor Pedro Vilaça

Agradecimentos

Este trabalho foi possível de ser realizado pela boa vontade de algumas pessoas nele envolvidas directamente, em concreto a minha Orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, por ter acreditado no meu potencial e me ter concedido a oportunidade de o realizar por me aconselhar e ter orientado em muitos aspectos da minha formação de forma a que me pudesse aperfeiçoar e adicionar à minha formação um maior valor acrescentado, em boa medida posso afirmar que este trabalho enriqueceu em muito o meu conhecimento das Espumas Metálicas e Soldadura por Fricção Linear. Ao Professor Doutor Pedro Vilaça por também ter acreditado em mim, de se ter esforçado muitas vezes em me acompanhar em longas conversações efectuadas após e antes de ensaios laboratoriais efectuados no DEM-IST muito importantes para que se pudesse chegar a bom porto com este trabalho.

Neste trabalho houve ainda lugar a outras pessoas envolvidas pelas necessidades que surgiram com o seu desenrolar, pessoas estas exteriores ao trabalho mas que devem ser mencionadas pelo seu apoio nomeadamente no DEM-IST, agradeço ao Eng. Samuel Santos no tempo que disponibilizou na recolha valiosa de dados de ensaio, ao Mestre Bruno Emílio por também ter disponibilizado algum tempo na recolha de dados e de ter partilhado algumas opiniões válidas para o desenvolvimento deste trabalho, ao Mestre Valentino Anok por ter ajudado também na recolha de alguns dados.

No laboratório DEMI da FCT UNL agradeço a ajuda do Sr. Paulo e ao Sr. António Campos, na muito preciosa ajuda concedida na elaboração das preparações laboratoriais e ainda na preparação de ensaios por MIG, estas ajudas tornaram realidade este trabalho.

Na finalização de agradecimentos, devo mencionar pessoas muito importantes que ajudaram a construir aparatos necessários aos ensaios, agradeço ao Sr. António Carneiro, por quem nutro uma amizade muito grande e respeito e que foi verdadeiramente correspondida à minha pessoa, ainda na ajuda em obter alguns aparatos agradeço ao Eng. Luís Rosas por ter disponibilizado recursos necessários para construção dos aparatos necessários aos ensaios. Ainda ao Sr. Pedro Teixeira da secção da Oficina Mecânica do IST por ter ajudado no processamento por fresadora de alguns materiais que permitiram tirar conclusões importantes.

Ao apoio muito importante da minha Família a Filomena minha esposa e companheira, a minha pequenita Catarina por querer a minha atenção e não me ter perturbado quando necessitava de tempo para este trabalho, e à Cecília minha irmã e Pai no apoio moral e força psicológica que me deram.

Como será possível caminhar em direcção ao futuro?

Sozinho?

Não, é o trabalho de equipa e à crença devotada e à união que faz o Homem em equipa mover o futuro na direcção pretendida.

Não poderia sozinho fazer este caminho sem a efectiva união e apoio de várias ajudas que recebi, um bem-haja à generosa natureza HUMANA, por vezes incompreendida pelos Homens e não em tempo algum por quem criou o Homem.

Em nome das crenças de todos, e em memória e homenagem da minha querida Mãe Maria Martins dos Santos da Costa.

Resumo

As espumas metálicas são conhecidas desde os anos 70 mas nos últimos anos foram alvo de desenvolvimentos significativos na fase de produção. Com os novos desenvolvimentos foi possível obter espumas mais resistentes que permitem aplicações estruturais mais nobres. A ligação destas espumas constitui contudo uma limitação significativa a potenciais aplicações.

Neste trabalho estudou-se a possibilidade de soldar espuma em alumínio tipo AA6061 fabricada pelo método de pulverotecnologia. Para isso foram ensaiados dois processos de soldadura distintos: no estado sólido por fricção linear e por fusão com arco eléctrico sob protecção gasosa inerte (MIG).

A soldadura por fricção linear emergiu nos anos 90 do século XX e pelo facto de ser um processo que se desenrola no estado sólido constitui uma tecnologia potencialmente interessante na ligação das espumas.

Desenvolveu-se um sistema de posicionamento adaptado ao material em estudo.

Verificou-se a dificuldade em unir estes materiais porosos devido ao colapso das paredes das células e ao facto de ser difícil estabelecer um fluxo de material contínuo o que conduz a uma limitada resistência mecânica das juntas obtidas. A compactação mecânica prévia até uma densidade relativa de 0,77 permitiu melhorar a zona do nugget que apresentava maior uniformidade e continuidade de material.

Foi possível ligar pelo processo MIG a espuma estudada, embora ocorra dano da estrutura devido á temperatura do arco eléctrico e, consequentemente, a integridade estrutural seja baixa.

Palavras-chave: soldadura por Fricção Linear, MIG, espumas metálicas

Abstract

Metallic foams are well known since the 70s but in the last years there were significant developments in the production of these materials. The new foams are more resistant and can be used in structural applications with higher added value. The joining of these foams remains, however, a significant limitation to potential applications.

The present study aimed at evaluating the possibility to join a AA6061 metallic foam produced by powder technology. For this two joining processes were tested: a solid state process – friction stir welding and a fusion process – MIG (metal Inert gas).

FSW emerged in the late 90s of XX century and since it is a solid state process it was considered as a potential technology for joining these foams.

A positioning system was developed adapted to the studied material and equipment used.

The difficulty of joining these materials was identified due to the collapse of the cell walls and the poor material flow that reduces mechanical strength of the joints. A previous mechanical treatment in order to obtain a relative density of 0.77 was seen to improve the nugget, increasing the uniformity and continuity of material in the weld.

It was possible to joint the studied foam by MIG, though there is a structural damage due to the high temperature in the electric arc. Thus, the structural integrity of the joints is poor.

Key words: friction stir welding, MIG, metallic foams.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice.....	iv
Índice Temático.....	v
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas.....	xi
Índice de Equações.....	xii

Índice Temático

1- Objectivos.....	1
2- Espumas Metálicas.....	2
2.1- Introdução.....	2
2.1.1- Classificação das Espumas.....	4
2.2- Métodos e técnicas de fabrico das Espumas.....	5
2.2.1- Processos baseados na Sinterização.....	6
2.2.1.1- Sinterização de pós metálicos.....	7
2.2.1.2- Sinterização de esferas ocas.....	8
2.2.2 - Investment Casting (Produção de espuma por Fundição).....	9
2.2.2.1- Uso de modelos descartáveis com estrutura celular aberta.....	9
2.2.2.2- Infiltração de um pó compacto de esferas ocas.....	11
2.2.2.3- Reprodução da estrutura de uma espuma de um polímero.....	11
2.2.2.4- Decomposição química de um produto químico.....	13
2.2.2.5- Adição de Gás.....	14
2.2.2.6- Solidificação direccional.....	15
2.2.2.7- Deposição metálica.....	16
2.3- Caracterização Mecânica das Espumas.....	18
2.3.1 - Propriedades Mecânicas das Espumas.....	18
2.3.2 - Comportamento das Espumas à compressão.....	20
2.4- Aplicações tecnológicos das espumas metálicas.....	25
2.4.1- Órgãos de máquinas.....	26
2.4.2- Reforço interno de componentes.....	26
2.4.3- Elementos perfilados para estruturas.....	28
2.4.4- Amortecimento do impacto.....	29
2.4.5- Indústria Química.....	30
2.4.6- Isolamento.....	34
2.4.7- Indústria Biomédica.....	35
3- Processo de Ligação.....	37
3.1- Soldadura por Fricção Linear (SFL) definição do processo.....	37
3.2- Parâmetros Operatórios.....	40
3.3- Aplicabilidade e vantagens da SFL.....	41
3.4- Ligas de Alumínio e suas designações.....	46
4- Experimentação.....	50
4.1- Materiais.....	50
4.2- Ensaio de SFL e MIG de provetes simples.....	52
4.3- Realização de Macrografias e Micrografias dos provetes.....	54
4.4- Ensaio de Dureza.....	55
5- Resultados e Discussão.....	56
5.1- Resultados dos ensaios de Esmagamento das Espumas Preliminares 1º lote de espumas.....	56

5.2- Resultados dos ensaios de Soldadura dos provetes simples 2º lote de espumas.....	58
5.3- Resultados do ensaio de Dureza.....	66
6- Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros.....	69
Bibliografia.....	75
Anexos.....	82

Índice de Figuras

Fig. 1 Esquema de processo de obtenção da espuma.....	3
Fig. 2 Processamento de espumas de poros abertos.....	4
Fig. 3 Micrografia Espuma poro fechado.....	4
Fig. 4 Micrografia Espuma poro fechado.....	4
Fig. 5 Micrografia Espuma poro fechado.....	4
Fig. 6 Várias Fotos de Espumas poro aberto.....	5
Fig. 7 Fotografia Espuma poro aberto.....	5
Fig. 8 Fotografia Espuma poro aberto.....	5
Fig. 9 Exemplos de ensaios laboratoriais de material poroso.....	7
Fig. 10 Órgãos de máquinas em metal sinterizado.....	7
Fig. 11 Método de fabricação de espumas de esferas ocas “Instituto Fraunhofer”.....	8
Fig. 12 Processo de Fabricação de esferas ocas.....	8
Fig. 13 Outro processo de produção de esferas mais complexo que o da Fig12.....	9
Fig. 14 Foto de esferas ocas.....	9
Fig. 15 Micrografia de espumas metálica 400 μm	10
Fig. 16 Processamento de espumas metálicas usando Cloreto de Sódio (Sal).....	10
Fig. 17 Variante do processo apresentado na Fig. 16.....	11
Fig. 18 Espuma produzida com esferas cerâmicas.....	11
Fig. 19 Fotografia de espuma obtida de uma espuma de poliuretano como modelo.....	12
Fig. 20 Espuma metálica obtida de um modelo de espuma de poliuretano.....	12
Fig. 21 Produção contínua de uma espuma metálica por introdução de um gás e agitação mecânica.....	14
Fig. 22 Aparato para produção de Espumas GASAR.....	15
Fig. 23 Espuma GASAR produzida por solidificação eutética.....	15
Fig. 24 Espuma resultante de deposição directa.....	16
Fig. 25 Montagem de uma célula electrolítica de deposição directa para redução de placas dos óxidos de metais reactivos.....	16
Fig. 26 Classificação de espumas quanto ao seu processo de produção.....	16
Fig. 27 Classificação de algumas espumas metálicas e suas designações comerciais.....	17
Fig. 28A Comparação entre porosidade e tipo de obtenção da espuma.....	18
Fig. 28B Vários tipos tipos de espuma de poro aberto distintas pelo poro e cor em função do material que as compõe.....	20
Fig. 29 Montagens possíveis, para ensaio de esmagamento de acordo com a orientação de poros da espuma.....	21
Fig. 30 Curvas tensão-extensão em compressão.....	22
Fig.31 Representação teórica do comportamento de uma espuma à compressão.....	23
Fig. 32 Ensaio de compressão de duas espumas de alumínio, uma de poro aberto (ERG) e outra de poro fechado (Alporas) de densidades idênticas.....	24

Fig. 33 Forma típica das espumas alporas à compressão.....	25
Fig. 34 Órgãos de máquinas.....	26
Fig. 35 Painel Sandwich, alumínio e espuma de alumínio segundo o NPL (National Physical Laboratory).....	26
Fig. 36 Secção Painel Sandwich.....	27
Fig. 37 Órgão estrutural de um veículo usando o princípio da Sandwich.....	28
Fig. 38 Componente de uma estrutura com reforço interno.....	28
Fig. 39 Perfis em espuma metálica para uso na construção de estruturas.....	28
Fig. 40 Curva típica de compressão das Espumas ERG.....	29
Fig. 41 Painel Sandwich aplicável como blindagem.....	29
Fig. 42 Pilha de Combustível, MEA - Membrane and Electrode Assembly.....	30
Fig. 43 Pilha de Combustível com membrana difusora de Espuma metálica.....	31
Fig. 44 Filtro para o escape de veículos Diesel para reduzir emissões de CO e partículas pesadas altamente poluentes para atmosfera.....	31
Fig. 45. Proposta de montagem de filtro de escape de múltipla acção composto de Espuma metálica sinterizada.....	32
Fig. 46 Radiador (m.pore) com ninho em Espuma Metálica (lado esquerdo), com detalhe construtivo (lado direito).....	33
Fig. 47 Motor Diesel, nº4 tem câmara TDC -Top Dead Center aberta e Motor nº 5 tem a câmara TDC isolada por uma válvula.....	33
Fig. 48 Protótipo de motor TDC com tecnologia PM, MDI.....	34
Fig. 49 Prótese dentária.....	35
Fig. 50 Implante da cabeça do osso Femoral revestido a Espuma Metálica.....	35
Fig. 51 Aplicações das Espumas Metálicas.....	36
Fig. 52 Ferramenta SFL.....	37
Fig. 53 Parametrização definidora do processo SFL.....	37
Fig. 54 Montagem de FSW - Friction Stir Welding (SFL).....	38
Fig. 55 Caracterização metalográfica de uma secção transversal típica da SFL de ligas de alumínio. Imagem de topo Esquema genérico; Imagem inferior Macrografia resultante da SFL de uma liga AA7075.....	39
Fig. 56 Juntas de Soldadura ou tipologias típicas para SFL.....	41
Fig. 57 A Hitachi recorrendo a SFL de perfis extrudidos constrói a caixa (carruagem) do comboio.....	42
Fig. 58 Perfis usados em Navios soldados por SFL.....	42
Fig. 59 Cabina do Eclipse 500 soldada por SFL.....	42
Fig. 60 Carcaça de Motor Eléctrico, e Tubo com uma Gola soldados por SFL.....	43
Fig. 61 Suporta de um banco de uma viatura.....	43
Fig. 62 Soldadura de Fricção por Pontos Spot Friction Welding, variante da SFW-Stir Friction Welding (SFL).....	44

Fig. 63 Processo de SFL por pontos segundo a MAZDA, e RIFTEC.....	44
Fig. 64 Cronologia mundial de produtos que usam SFL.....	46
Fig. 65 Máquina SFL ESAB da secção de Tecnologia Mecânica do IST.....	50
Fig. 66 Ensaio de esmagamento preliminar na Máquina de SFL da Secção de Tecnologia Mecânica do IST.....	51
Fig. 67 Comparação entre os provetes 7, 4 e 1, 1 e 4 foram esmagados no ensaio preliminar.....	51
Fig. 68 Comparação em perfil de provete esmagado e não esmagado no ensaio preliminar.....	51
Fig. 69 Provetes de soldadura.....	52
Fig. 70 Prensa Hidráulica de 40 T de força.....	52
Fig. 71 - Fixação dos provetes na máquina SFL.....	52
Fig. 72 Ensaio de soldadura.....	52
Fig. 73 Ferramenta SFL usada nos ensaios de soldadura.....	53
Fig. 74 Sholder e pino da ferramenta SFL usada nos ensaios.....	53
Fig. 75 Máquina de corte de amostras ATA Brillant 221.....	54
Fig. 76 Montagem de Proвете em Resina.....	54
Fig. 77 Máquina de polimento de amostras.....	54
Fig. 78 Microscópio Óptico da secção Laboratorial da secção mecânica do DEMI.....	55
Fig. 79 Microdurómetro Struers Duramin.....	55
Fig. 80 Ensaio de esmagamento dos Provetes preliminares 1, 2 e 3 (1º lote de espumas)	57
Fig. 81 Macrografia da face de topo (revela passagem do shoulder) e raiz do Proвете Pr6F1.....	59
Fig. 82 Macrografia da face de topo (revela passagem do shoulder) e raiz do Proвете Pr8F1.....	59
Fig. 83 Micrografia (ampliação 50x) do provete, extremo direito do cordão de SFL.....	60
Fig. 84 Micrografia (ampliação 50x) provete, intermédio direito do cordão de SFL.....	60
Fig. 85 Micrografia (ampliação 50x) do provete intermédio esquerdo do cordão de SFL.....	61
Fig. 86 Micrografia (ampliação 50x) do provete extremo esquerdo do cordão de SFL.....	61
Fig. 87 Micrografia (ampliação 50x) na zona central do cordão.....	61
Fig. 88 Micrografia, (ampliação 100x) zona intermédia esquerda do cordão, a seta rosa serve de ponto de referência num poro.....	62
Fig. 89 Micrografia (ampliação 100x) na zona intermédia direita do cordão, seta rosa serve de ponto de referência num poro.....	62
Fig. 90 Evolução da Força Vertical no decorrer da formação do cordão de soldadura de Pr6F1.....	63

Fig. 91 Provete Pr8F1 imediatamente após a realização da passagem da Ferramenta SFL.....	64
Fig. 92 Ensaio SFL de Espumas por esmagar na tipologia LAP PENETRATION.....	65
Fig. 93 Micrografia (ampliação 50x) do provete do cordão de SFL.....	66
Fig. 94 Micrografia (ampliação 200X) dos ensaios de dureza 1 e 2.....	66
Fig. 95 Micrografia (ampliação 200X) dos ensaios de dureza 3 e 4.....	67
Fig. 96 Provete soldado por MIG vista de topo.....	67
Fig. 97 Provete soldado por MIG de diversas vistas.....	68
Fig. 98 Dano resultante do escorvamento.....	68

Índice de Tabelas

Tab. 1 Designação das Ligas de Alumínio e Ligas de Fundição.....	48
Tab. 2 Designações de Tempera (endurecimento).....	49
Tab. 3 Ferramenta SFL usada nos ensaios de soldadura.....	53
Tab. 4 Parâmetros de ensaios de SFL.....	53
Tab. 5 Massa dos provetes antes e após ensaios de esmagamento.....	56
Tab. 6 Dimensões dos Provetes Preliminares.....	56
Tab. 7 Densidade Relativa durante os ensaios de esmagamento.....	57
Tab. 8 Caracterização dos Provetes de Espuma Esmagados antes da SFL.....	58
Tab. 9 Resultados Finais do ensaio SFL.....	58
Tab. 10 Resultados de alguns ensaios de dureza efectuados.....	67
Tab. 11 Caracterização dos Provetes de Espuma ensaiados.....	69

Índice de Equações

Equação 1 Teórica das propriedades mecânicas das espumas.....	18
Equação 2 Teórica alternativa das propriedades mecânicas das espumas.....	18

1. Objectivo

As espumas metálicas são materiais porosos conhecidos desde os anos 70, obtidos por processos de fabrico distintos e com aplicações, essencialmente, em isolamentos acústicos, particularmente, na indústria automóvel.

Os avanços em termos de processo de obtenção de espumas permitiram produzir materiais com características superiores, adequadas a aplicações mais nobres, requerendo mais resistência mecânica.

A possibilidade de unir espumas metálicas permitiria desenvolver produtos de maior valor acrescentado, por exemplo para a indústria biomédica.

O presente trabalho visa investigar a possibilidade de unir espumas metálicas por soldadura por fricção linear (SFL), um processo em franca expansão com um enorme potencial de desenvolvimento.

Para isso foram realizadas ligações por SFL na secção de Tecnologia Mecânica do IST e caracterizadas as ligações obtidas.

Em alternativa ensaiou-se um processo de ligação por fusão, MIG, e identificaram-se alguns problemas de soldabilidade, embora fosse possível soldar as espumas sem que ocorresse fractura.

Um aspecto que se revelou de primordial importância foi o tratamento inicial das espumas que condicionou a facilidade de ligação e a qualidade da soldadura obtida.

2. Espumas Metálicas

2.1- Introdução

As espumas metálicas são conhecidas há já algum tempo, contudo, o seu desenvolvimento está em franca fase de pesquisa e desenvolvimento na actualidade.

Novas formas de produção têm permitido produzir espumas para aplicações com maior valor económico acrescentado e por outro lado começa a ser viável a sua produção em massa.

As estruturas celulares estão presentes nos materiais naturais. O osso ou a madeira são exemplos de estruturas celulares ou porosas. Estas estruturas combinam uma dureza relativamente alta e força de coesão, com uma baixa densidade. São geralmente usadas em situações onde o peso deve ser minimizado. O tamanho e a forma das células/poros determinam as suas propriedades. As exigências das diferentes partes duma estrutura, podem requerer elementos leves e resistentes que desta forma melhoram a eficiência destas estruturas. As estruturas celulares, ou materiais porosos, oferecem ainda uma maior resistência a danos ou fracturas súbitas, uma vez que as estruturas de poros abertos têm a capacidade de absorver esforços de tracção ou compressão. As espumas podem ser extensamente usadas como protecções, por apresentarem uma excelente capacidade de dissipação da energia de impacto, entre outras [1-2].

O primeiro registo conhecido data de 1940 para as primeiras espumas de metal. Benjamim Sosnick registou uma patente [3] para um processo de fazer espumas denominado "Process for making Foamlike Mass of Metal". Este método explorou o facto de em certas ligas metálicas existirem fases diferentes após entrar no domínio da fusão de um dos componentes da liga, os seus constituintes por terem diferentes pontos de fusão, fundiam por essa razão a temperaturas diferentes permitindo a origem das ditas fases, desta forma poderia acontecer que nesta liga um ou mais dos seus componentes entrassem em eferescência independentemente do outro componente da liga. Neste processo, a liga gera uma multi-fase ao ser aquecida, a composição da liga era escolhida de forma que um dos seus componentes entrasse sempre em eferescência enquanto, que o outro apenas fundia.

A liga era mantida num recipiente pressurizado durante a fase de aquecimento, de forma que o metal na forma gasosa não pudesse escapar da fase líquida enquanto estivessem dentro do recipiente. Libertando a pressão, a liga no estado líquido entra em eferescência súbita, por ter difundido o metal na forma gasosa e ao arrefecer rapidamente este metal, formava um sólido cheio de poros fechados. Obviamente, só algumas ligas eram realmente satisfatórias para este processo, porque um dos elementos de liga tinha de ter um ponto de ebulição baixo. Este efeito é reflectido nas composições metalúrgicas sugeridas (as quais incluíam elementos relativamente voláteis como o zinco, cádmio e mercúrio).

Este processo era bastante caro, e só produziu pequenas quantidades de uma espuma bastante irregular. O processo é mostrado esquematicamente na Figura 1.

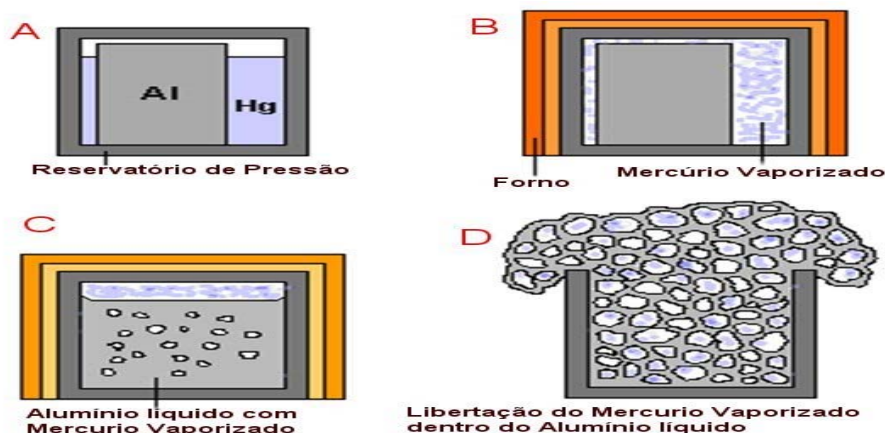


Fig. 1 Esquema de processo de obtenção da espuma. [3]

Durante a fase de aquecimento, os dois metais são contidos dentro de um recipiente pressurizado (A), aquecido a uma temperatura acima da temperatura de vaporização de um dos componentes, neste caso o mercúrio (B).

O mercúrio é restringido completamente no reservatório e vaporiza mesmo com a pressão dentro do recipiente. Continuando o aquecimento até à temperatura de fusão do outro metal da liga que é o alumínio, o metal volatilizado difunde-se no líquido metálico. O alumínio fundido fica saturado com gás de mercúrio (C). Então o material fundido é removido do recipiente sob pressão e o mercúrio, vaporizado completamente e difundido na fase líquida, expande dentro da liga, produzindo bolhas de gás dando origem a uma espuma (D). Efectua-se então um arrefecimento rápido até a liga solidificar.

Na década de 1950, surgiram as primeiras espumas metálicas de poros abertos. Este processo consistia em verter alumínio fundido numa pré-forma ou molde contendo grãos de sal compactados, ao solidificar o Alumínio ia dissolvendo o sal, que deixava poros abertos. A Figura 2 apresenta o método.

Este processo produzia uma estrutura de espuma mais coesa que o método de Sosnick, mas nessa altura, este material foi visto como uma curiosidade técnica em vez de ser encarado como um material de engenharia avançada. Este processo foi desenvolvido, usando um molde que era feito de um material solúvel em água, sendo contudo capaz de resistir à temperatura do metal fundido.

Era colocado no molde um material que fundia com o metal no estado líquido tipicamente sal em pedra devido a seu baixo custo. Este material era vibrado e comprimido até uma densidade considera estável (estágio 1 na Figura 2) e era então sinterizado e arrefecido (2). Os grãos de sal fundiam parcialmente e junto aos pontos de contacto entre os

grãos estabeleciam-se ligações, conseguindo-se um bloco rígido de sal com a forma do molde. Este bloco fica repleto de canais abertos resultantes dos espaços existentes entre os grãos originais (3). No processo mais simples, o alumínio fundido era vertido simplesmente sobre o bloco para se infiltrar nos canais. Posteriormente, toda a estrutura era retirada do molde, arrefecida, e colocada em água para dissolver o sal (6). Isto produzia uma espuma de poros abertos em que o tamanho dos poros era semelhante ao dos grãos de sal originais. A dimensão mínima dos poros era aproximadamente de 1 mm. Este processo está descrito na Fig. 2.

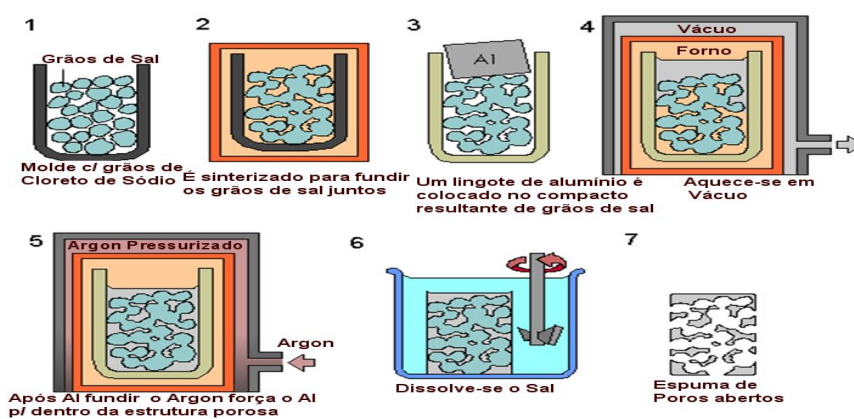


Fig. 2 Processamento de espumas de poros abertos. [4]

2.1.1- Classificação das Espumas

Na literatura Anglo-saxónica estas espumas são referidas por:

Open Cell Foam structures ou Open Porous Foam Structures as estruturas de poros abertos ou espumas de poros abertos

Closed Cell Foam Structures ou Closed Porous Foam Structures as estruturas de poros fechados ou espumas de poros fechados. Pode-se avaliar nas Figuras 3, 4 e 5 a forma e o aspecto que as espumas de poro fechado assumem. Este tipo de material não está cingido a um metal em particular, qualquer metal é potencial gerador destas estruturas.

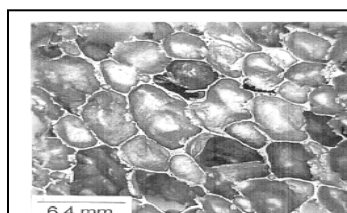


Fig. 3 Micrografia Espuma poro fechado. [2]

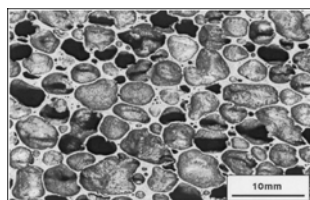


Fig. 4 Micrografia de Espuma poro fechado. [4]

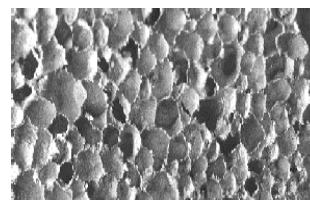


Fig. 5 Micrografia de Espuma poro fechado. [5]

Este material devido à sua porosidade apresenta uma densidade menor que a de um corpo exactamente igual, feito do mesmo material que constitui a espuma, mas na forma maciça. As propriedades físicas destes materiais, serão abordadas mais adiante neste texto.

A outra forma mencionada anteriormente é uma estrutura fechada, as Figuras 6, 7 e 8 referem-se a espumas de poros abertos

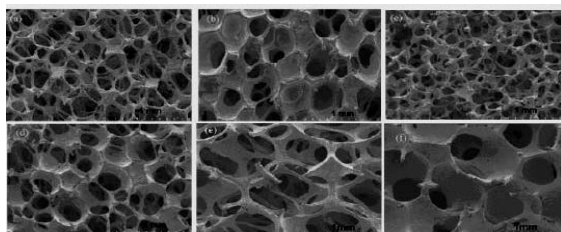


Fig 6 Várias Fotos de Espumas poro aberto. [6]

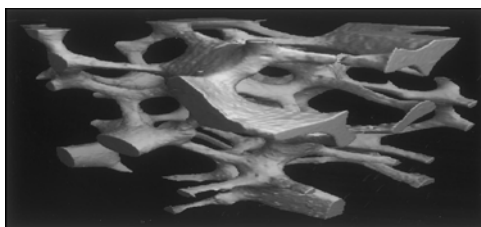
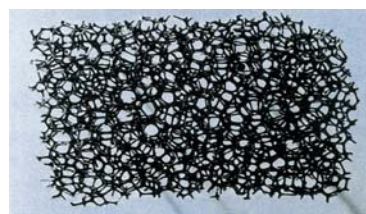


Fig. 8 Fotografia Espuma poro aberto. [8]



(a)



(b)

Fig. 7 Fotografia Espuma poro aberto. [7]

2.2- Métodos e técnicas de fabrico das Espumas

Existem diversos métodos de produção de espumas metálicas baseadas na sinterização, na fundição e na electrodeposição de precursor descartável.

Os métodos de Produção são os seguintes:

- Processos baseados na Sinterização

 - Sinterização de pós metálicos

 - Sinterização de esferas ocas

- Investment Casting (Espuma por Fundição)

 - Uso de modelos descartáveis com estrutura celular aberta

 - Infiltração de um pó compacto de esferas ocas

 - Reprodução da estrutura da uma espuma de um polímero

 - Decomposição química de um agente químico

 - Adição de Gás

 - Solidificação Direcional

 - Deposição metálica

- Electrodeposição num precursor descartável

2.2.1- Processos baseados na Sinterização

A sinterização é o método mais antigo para a fabricação de cerâmicas, especialmente de tijolos, telhas, pisos, azulejos e utensílios. A sinterização de pós é também largamente aplicada na produção de refractários, polímeros, metais e de alguns tipos de materiais compósitos. A sinterização é um fenómeno de carácter universal. Ela ocorre, por exemplo, quando partículas de no máximo de poucas centenas de microns de diâmetro, que encontram-se em estreito contacto e a temperatura do ambiente é suficientemente alta para produzir a união por coalescência, isto é, pela fusão de superfícies adjacentes. Muitas vezes as partículas em contacto podem ser até milimétricas. Mas se a temperatura do ambiente ultrapassar o ponto de fusão de algumas partículas, ocorrerá a sinterização pela formação de uma fase líquida. Em ambas as situações para que a sinterização ocorra é necessário que o sistema de partículas esteja o mais empacotado possível e que os vazios existentes entre elas sejam também, no máximo, micrométricos [11].

Incluem-se ainda nesta definição

Prensagem isostática a quente (em inglês HIP: Hot Isostatic Pressure): Prensagem de um pó dentro de um molde mergulhado em um líquido ou gás, de modo que a pressão se transmita igualmente em todas as direcções do molde.

Sinterização: União físico-química de um sistema de partículas empacotadas pela formação de ligações entre elas. O processo é geralmente acompanhado por um aumento na resistência mecânica, ductilidade e, em várias situações, pelo aumento na densidade.

Sinterização com Fase Líquida: União de um sistema de partículas empacotadas pelo surgimento de uma fase líquida dentro do sistema.

Sinterização Activada: Adição de um aditivo (<1%) que fundirá durante a sinterização, produzindo um líquido de baixa viscosidade que molha as partículas que estão a ser sinterizadas.

Sinterização Reativa: A sinterização é realizada intencionalmente na temperatura de transformação de fases (decomposição, reacções polimórficas, etc.), utilizando a energia do processo de transformação que ocorre em cada partícula do sistema.

Fonte [11]

2.2.1.1 - Sinterização de pós metálicos

Um dos métodos mais simples para produzir espumas de poros abertos consiste na sinterização de pós metálicos. Normalmente estas estruturas porosas são produzidas por atomização de um gás, a uma temperatura perto do ponto de fusão das partículas do pó. Este gás provoca uma fusão parcial das partículas e ao arrefecer as partículas cristalizam, acabando por se ligarem face com face para produzir um material com porosidade.

A sinterização é levada a cabo frequentemente em vácuo ou em atmosfera inerte para prevenir a oxidação da superfície das partículas metálicas. [1]

A Figura 9 é um exemplo de material sinterizado com partículas grandes. [12]

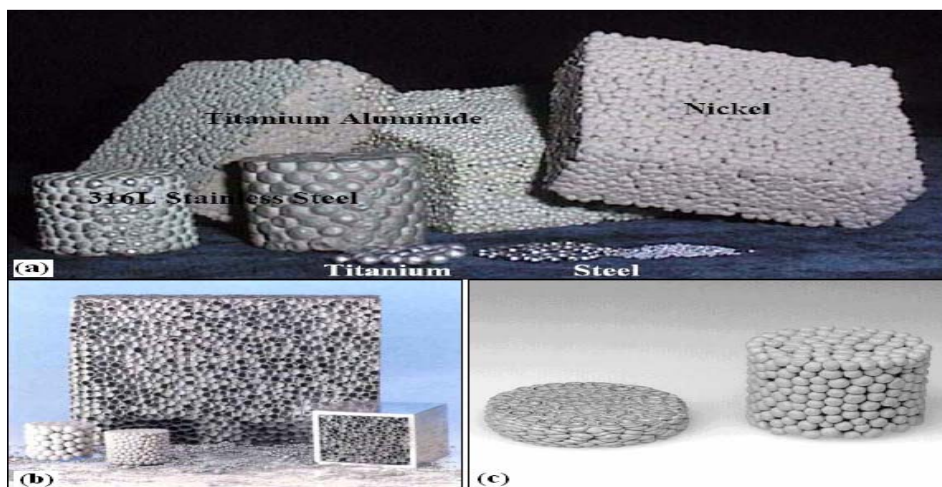


Fig. 9 Exemplos de ensaios laboratoriais de material poroso. [9,10]

O grau de porosidade deste material depende muito da forma como o empacotamento destas partículas ou esferas é feito, uma baixa densidade pode ser obtida misturando partículas de um material volátil com o pó metálico que evapora ou decompõe-se à temperatura de sinterização para deixar bolhas de gás adicionais na estrutura. Este tipo de sinterização pode produzir peças como ilustra a Figura 10



Fig. 10 Oraões de máquinas em metal sinterizado. [12]

2.2.1.2 - Sinterização de esferas ocas

Uma das formas de produção destes materiais é definida pela Figura 11, esta técnica foi apurada pelo Instituto Fraunhofer na Alemanha. A Figura 11 descreve a fase de produção de esferas metálicas ocas a partir de polyester. As esferas de poliéster são revestidas por pó metálico (coating). A sinterização tem então dois caminhos.

(1) São comprimidas (forming da Figura 12) na forma que se pretenda, seguindo-se uma fase de aquecimento onde ocorre a pirólise (destruição) do polyester, a sinterização inicia com aquecimento das esferas revestidas e prensadas e ao arrefecerem obtém-se então uma estrutura porosa.

(2) Se as esferas não são comprimidas então simplesmente obtém-se esferas ocas revestidas de metal juntas e por não terem sido prensadas formam um material poroso de esferas metálicas simplesmente unidas. O aquecimento em ambos os processos é sempre perto do ponto de fusão do pó metálico levando a que estas esferas ao solidificarem estabeleçam uma ligação físico-química, este processo é sempre de forma que não se deforme a estrutura final obtida como a Figura 11 apresenta [12].

Pode ainda existir uma outra forma de obtenção das esferas metálicas ocas.

A Produção de esferas de alumínio ocas pode ser feita por instabilidade capilar de um líquido com um fluxo de gás no seu interior, verte-se uma solução na vertical de forma que forme uma coluna com ar e metal fundido, tem de ser vertidos concentricamente até se conseguir formar uma coluna como descreve a Figura 12 [1].

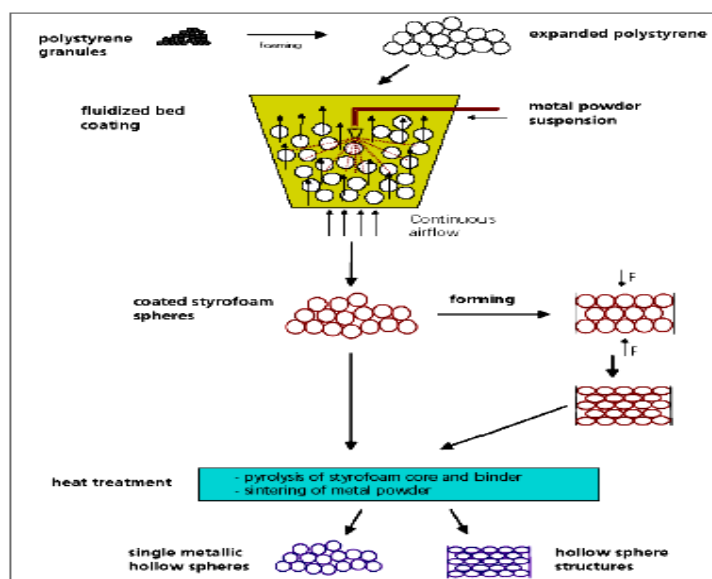


Fig. 11 Método de fabricação de espumas de esferas ocas "Instituto Fraunhofer". [9-10]

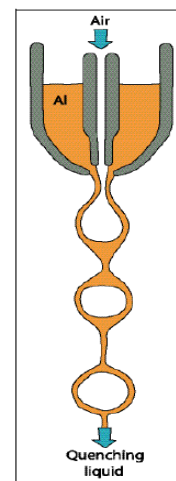


Fig. 12 Processo de Fabricação de esferas ocas. [1]

Com um controlo rigoroso dos parâmetros de fluxo são produzidas bolhas de metal separadas entre si, a mistura solidifica durante a sua queda devido ao vertimento contínuo, o interior das bolas metálicas do líquido metálico contem um gás, ao refrigerar o meio circundante por ventilação fresca ocorre a solidificação destas bolhas ocas, obtendo-se então assim de outra forma as esferas metálicas ocas.

O método do Instituto Fraunhofer tem uma vantagem em termos de eficiência maior. Pode ainda de outra forma obter-se as esferas como exemplifica a Figura 13. [1]

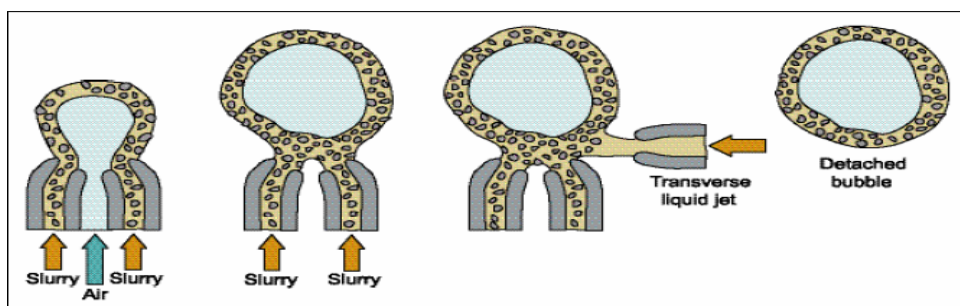


Fig. 13 Outro processo de produção de esferas mais complexo que o da Fig12. [1]

A imagem da Figura 14 evidencia o aspecto e forma de uma esfera oca apresentado por estes métodos.



Fig. 14 Foto de esferas ocas. [13]

2.2.2 - Investment Casting (Produção de espuma por Fundição)

Este grupo recorre à fundição, existem vários métodos comerciais patenteados a referir.

2.2.2.1 - Uso de modelos descartáveis com estrutura celular aberta

Nesta técnica a maioria dos processos, produzem principalmente espumas de poros abertos. Recorre-se a modelos descartáveis para a obtenção da estrutura celular e assim se consegue um excelente compromisso de estruturas de poro muito refinado, como mostrado na Figura 15. As espumas assim produzidas têm tamanhos de poro da ordem de $400\mu\text{m}$, e com uma densidade relativa de 0.2-0.3, Na Figura 16 esquematiza-se o processo e na Figura 15 apresenta-se uma macrografia do resultado deste processo.

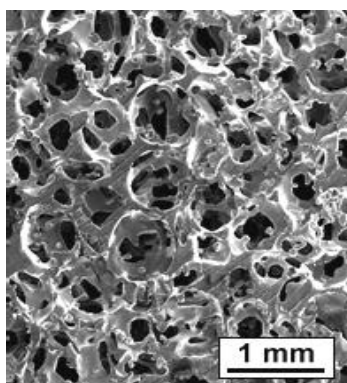


Fig. 15 Micrografia de espumas metálica 400 μm .

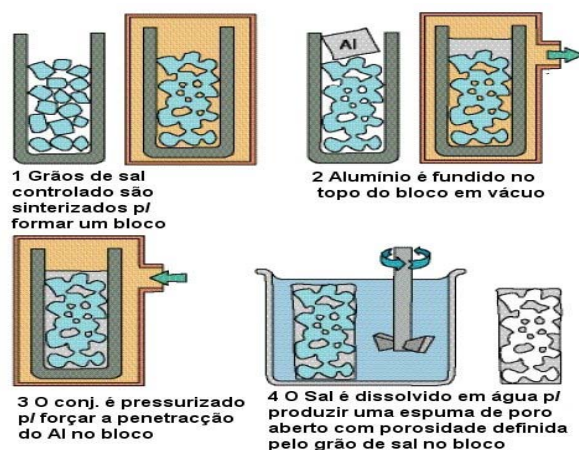


Fig. 16 Processamento de espumas metálicas usando Cloreto de Sódio (Sal).

De forma a facilitar a compreensão deste processo na Figura 16 é apresentado de forma gráfica o processo descrito.

Os processos de infiltração não requerem pós metálicos caros ou fibras, e praticamente qualquer liga pode ser usada desde que o seu ponto de fusão seja inferior à temperatura de destruição do modelo sinterizado que dará forma à espuma. Como os elementos que formam o modelo podem ser controlados cuidadosamente, as espumas produzidas são caracterizadas por um alto grau de uniformidade estrutural muito refinado. O processo é relativamente complexo, requerendo a dissolução do modelo posteriormente. O limite inferior e o limite superior do tamanho do poro é determinado pela facilidade da infiltração do metal líquido uma vez que o modelo pode apresentar canais muito tortuosos, e também que a dissolução da estrutura salina que forma o modelo da espuma, possa levar um tempo razoável na sua eliminação. [1]

Numa variante do processo, mostrada na Figura 16, o metal na forma de pó é misturado com sal em forma de partículas, esta mistura é compactada para formar um bloco denso. É então sinterizada, a uma temperatura que funde o metal (esta temperatura deve ser inferior à fusão do sal), seguindo-se a dissolução do sal, consegue-se por este método espumas com densidade relativa > 0.2 . Este processo é pouco prático apresenta alguns constrangimentos, que elevam a complexidade do processo de infiltração, a pressão será uma exigência adicional e relativamente ao metal na forma de pó este é muito caro. A vantagem deste processo parece produzir menos conexões entre os grãos de sal, conduzindo a uma estrutura mais densa, menos porosa, contendo NaCl residual difícil de eliminar. A Figura 17 ilustra este processo que é uma variante da Figura 16.

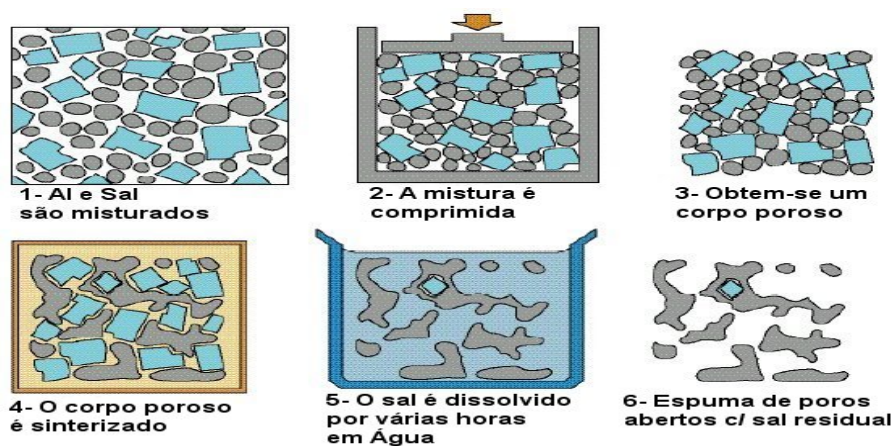


Fig. 17 Variante do processo apresentado na Fig. 16.

2.2.2.2 - Infiltração de um pó compacto de esferas ocas

Pode-se usar esferas ocas como modelo da estrutura porosa. As esferas podem ser Cerâmicas ou Metálicas com diâmetros que podem ir até $\sim 60\mu\text{m}$, são depositadas dentro dum molde e devem ser o mais uniformemente possível dispostas no preenchimento do molde. Por vezes as esferas têm de ser pré aquecidas. A infiltração deve ocorrer a uma pressão relativamente baixa (~ 0.5 bar). A Figura 18 evidencia as espumas obtidas. As esferas podem ser ordenadas através do tamanho e podem ser organizadas em estruturas muito regulares. A densidade relativa do material depositado com as esferas pode alcançar valores da ordem de 0.4. [1]

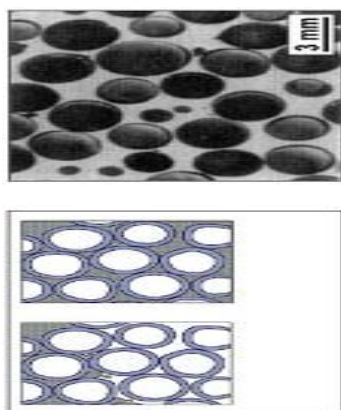


Fig. 18 Espuma produzida com esferas cerâmicas.

2.2.2.3 - Reprodução da estrutura de uma espuma de um polímero

Este tipo de espuma é relativamente fácil de produzir, trata-se de uma espuma de alta porosidade de poro aberto; na sua produção são usados modelos de espumas de polímeros com estruturas uniformes. A espuma é do tipo representado na Figura 19.

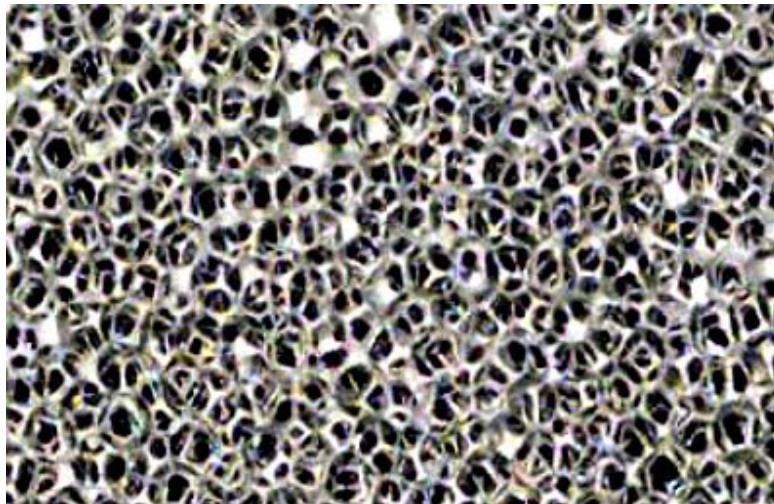


Fig. 19 Fotografia de espuma obtida de uma espuma de poliuretano como modelo. [14]

O polímero geralmente é o poliuretano, infiltrado com gesso e aquecido posteriormente para queimar ou para eliminar o polímero. O modelo será o negativo da espuma é então inundado com metal fundido. Frequentemente ajuda-se o processo combinando vácuo e pressão externa. A Figura 20 ilustra o processo.

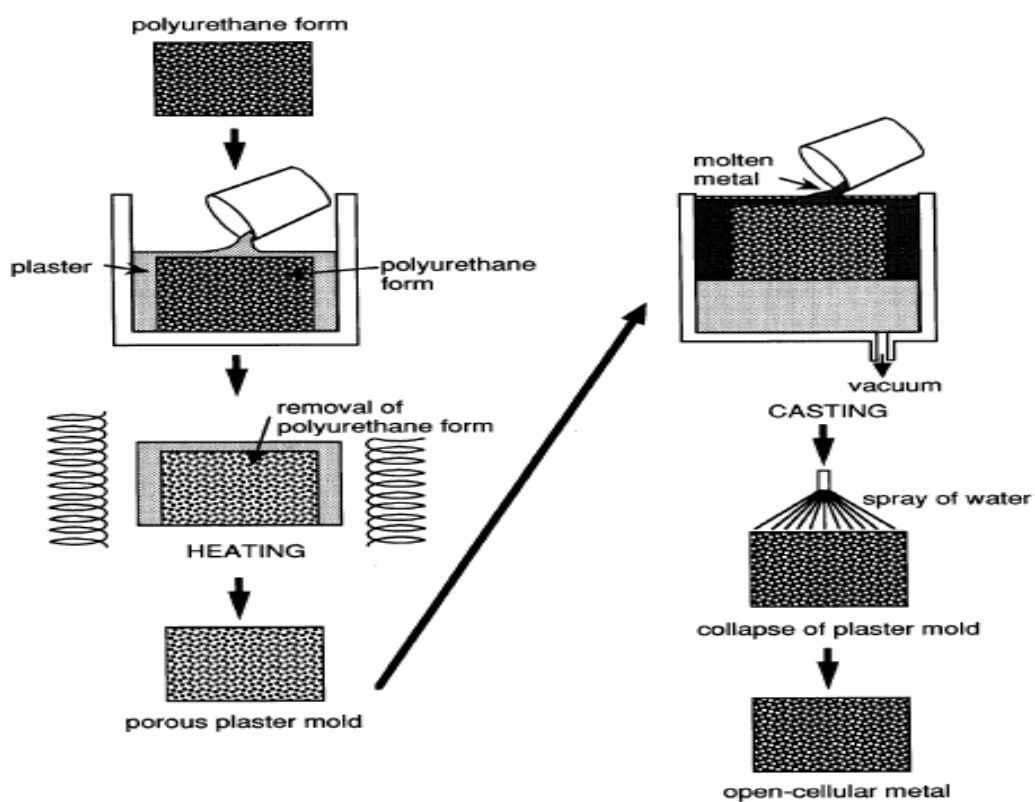
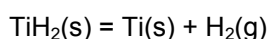


Fig. 20 Espuma metálica obtida de um modelo de espuma de poliuretano. [7]

2.2.2.4 - Decomposição química de um produto químico

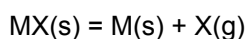
A decomposição química envolve uma reacção endotérmica com libertação de um Hidreto. O agente precursor químico ou agente espumante mais conhecido é o Hidreto de Titânio TiH_2 que é uma substância química na forma de pó ou agente espumante, estável à temperatura ambiente, mas que liberta um gás à temperatura de fundição, que se difunde no material fundido decompondo-se em titânio e hidrogénio a temperaturas superiores a $\sim 400^\circ\text{C}$ de acordo com a reacção:



Também é usado o Carbonato de Cálcio capaz de gerar uma reacção do tipo



De um modo geral, qualquer material estável à temperatura ambiente pode libertar um gás a uma temperatura elevada, é então um agente espumante potencial. Isto inclui substâncias químicas do tipo hidretos inorgânicos como cloreto de cálcio, sulfato cúprico e iodeto de bário, como também minerais em camadas hidratados como a vermiculite. Quando aquecidas acima da temperatura de decomposição tipicamente entre 400 e 1300°C estas substâncias químicas são desidratadas libertando vapor de água que pode ser usado assim para criar espuma num metal fundido. Metais que contenham hidratos, óxidos, nitritos, sulfatos e carbonatos, também são razoáveis: A uma temperatura suficientemente elevada, eles sofrem uma decomposição química da forma:



A maior parte de trabalhos de produção de espumas de fundições é com alumínio, devido, principalmente à sua baixa densidade, e ao relativamente baixo ponto de fusão, e resistência à corrosão. O alumínio puro funde a 660°C , e alumínio-silicone e alumínio-magnésio na forma de liga, amplamente usados nas espumas metálicas, tem temperaturas de fusão de $\sim 575^\circ\text{C}$. [1]

No fabrico de espumas por este método o agente químico precursor recorre a duas formas distintas.

Forma metal Líquido, recorre ao metal fundido onde se verte o agente químico “funcionando como um Fermento” na forma de pó no metal líquido.

Forma metal sólido, recorre ao uso de uma massa na forma de pó em que o metal e o agente químico encontram-se na forma de pó ou grânulos tendo-se de se misturarem muito bem antes da fusão num forno.

2.2.2.5 - Adição de Gás

O método mais simples de obter uma espuma recorrendo à fundição, envolve a injeção de gás no metal fundido. As exigências fundamentais para que este método produza uma espuma, implica gerar eficazmente bolhas de boa qualidade e dispersadas, e que se mantenham o tempo suficientemente longo para que ao solidificar o metal as bolhas que não se escaparam formem a espuma, é exigido que se use um agitador que espalha ou difunda as bolhas de gás. As bolhas sobem para a superfície do metal fundido, e ao saírem pela zona de formação das espumas existe uma correia de transporte. As espumas são enformadas suavemente nos rolos de saída da fundição enquanto arrefecem. A espuma formada é uma placa contínua e está representada na Figura 21, este processo é conhecido por Hydro/Alcan/Combal.

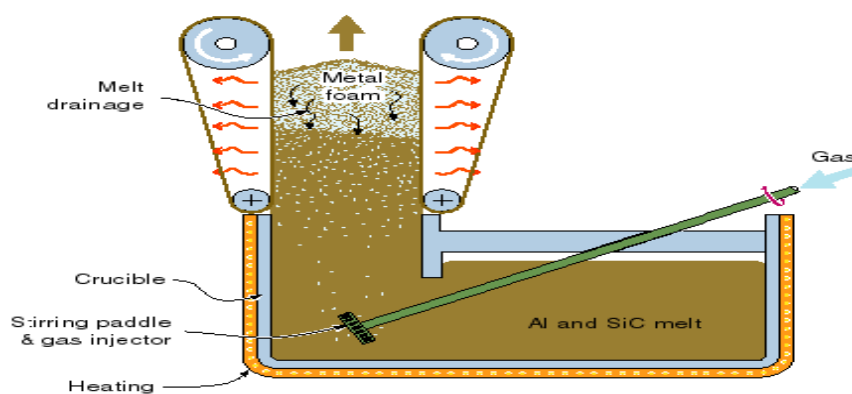


Fig. 21 Produção contínua de uma espuma metálica por introdução de um gás e agitação mecânica. [15]

As espumas formadas por metal líquido estático apresentam internamente uma elevada instabilidade. A drenagem do metal fundido ocorre para a base da espuma onde ocorrem gradientes de densidade na espuma. As bolhas fundem debaixo da superfície devido a acção de tensão da superfície do metal líquido, enquanto que surgem poros maiores no centro do corpo que se geram ao arrefecer lentamente o metal, e no topo da espuma formam-se paredes finas nas bolhas da espuma. Para minimizar estes efeitos, pós refractários ou fibras (tipicamente 10 % do vol. de SiC com 10 microns) são adicionadas no metal fundido. Esta acção aumenta a viscosidade do metal fundido, como também a segregação preferencialmente na interface gás-líquido e agir como um material surfactante (capaz de alterar as propriedades superficiais e inter faciais de um líquido [25]). Combinando uma extracção vertical da espuma para eliminar os gradientes de densidade, permite a produção de placas de espuma de forma continua em grandes quantidades a baixo custo e de produção em larga escala de portas e ou divisórias resistentes ao impacto.

2.2.2.6 - Solidificação direccional

A diferença existente na solubilidade do hidrogénio líquido e metais sólidos pode ser usada na produção de metais porosos, recorrendo a uma solidificação controlada no ponto eutético (metal-gás).

O processo GASAR, usa hidrogénio a elevada pressão que é introduzido num metal fundido, de forma a ocorrer a dissolução do gás no metal fundido. O metal fundido é de seguida transferido para um molde com uma base arrefecida adequadamente como está exemplificado na Figura 22, verte-se a mistura líquida de metal e gás numa forma a uma razão de $\sim 5\text{mm/s}$. Liberta-se um gás na frente que solidifica, ocorrem então nucleações alongadas porosas, e em simultâneo surge uma estrutura lamelar que pode ser formada de um binário metal-metal eutectico. A Figura 23 demonstra o aspecto final com que uma espuma direccional fica após o processo de fabricação.

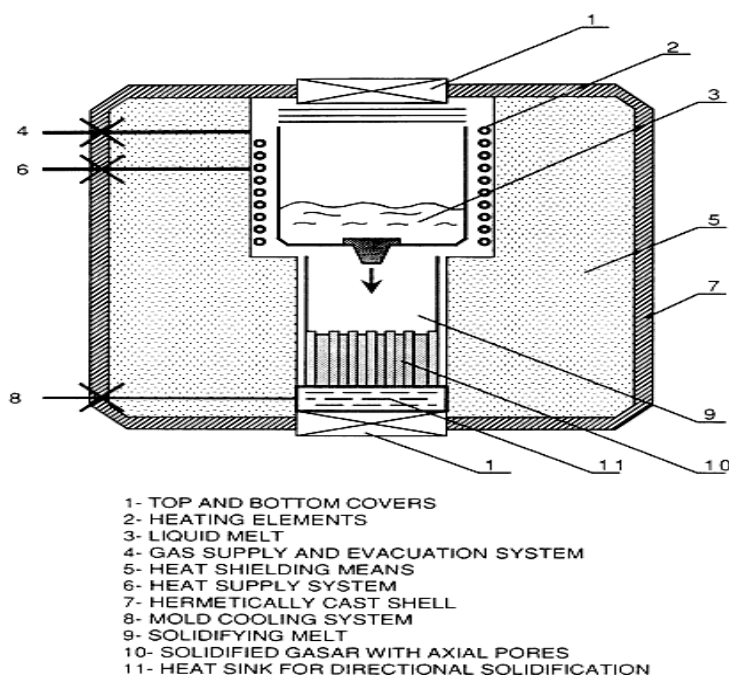


Fig 22 Aparato para produção de Espumas GASAR. [16]

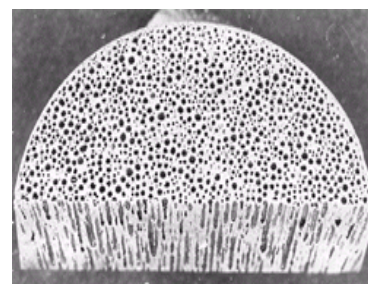


Fig. 23 Espuma GASAR produzida por solidificação eutética. [17]

As espumas resultantes deste processo é lhes atribuído o nome estruturas de lótus, já se conseguiu a produção destas espumas de Ni, Cu, Al, Fe e Mg, com diâmetros do poro de $10\text{ }\mu\text{m}$ a 5 mm com uma porosidade (densidade relativa) de 0.35. [1]

2.2.2.7 - Deposição metálica

Recorrendo a um processo por electro-oxidação é possível extrair metais reactivos como Nd, V, Nb e Ti dos seus óxidos numa solução salina, e que reproduzem os metais na forma de uma espuma de poro aberto extremamente regular e perfeita, a Figura 24 demonstra a sua forma. Uma ilustração da montagem do processo é representada na Figura 25.

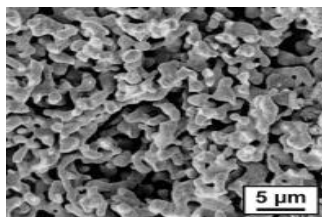


Fig. 24 Espuma resultante de deposição directa.

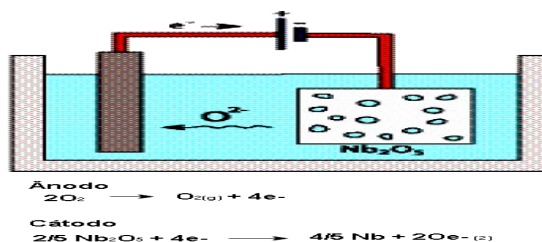


Fig. 25 Montagem de uma célula electrolítica de deposição directa para redução de placas dos óxidos de metais reactivos.

Para se produzir uma espuma de Ti, é necessário aplicar-se uma voltagem de ~ 3 V ao óxido num banho de uma solução CaCl_2 fundido a 950°C durante 12 horas. Este processo apresenta-se dispendioso e relativamente perigoso, contudo pode produzir espumas de elevada qualidade. A sua produção pode ser justificada apenas para a aplicação que se pretenda dar, como elementos filtrantes que tem uma porosidade de elevada qualidade.

Resumo genérico das Espumas Metálicas

De uma forma genérica as espumas são classificadas pela sua forma de fabrico, material que a constitui, o tamanho do grão descrito por ppi (pore per square inch). A forma do fabrico das espumas pode ser agrupada em quatro famílias como se ilustra na Figura 26.

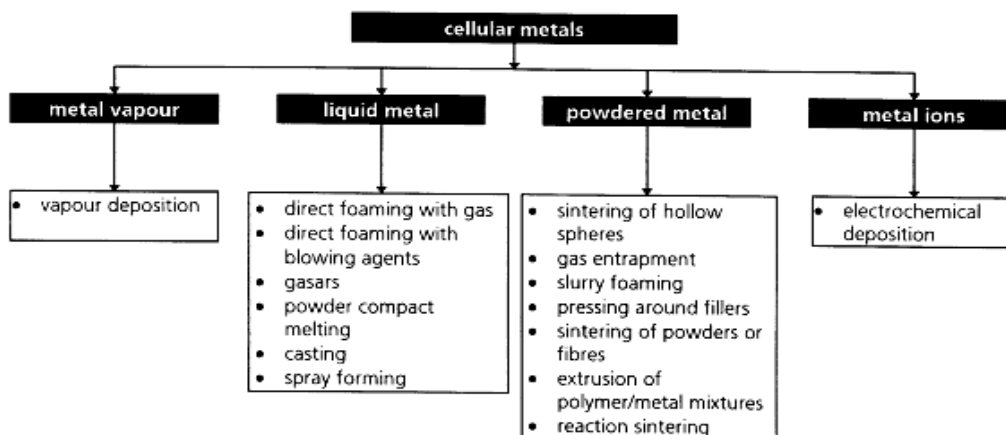


Fig. 26 Classificação de espumas quanto ao seu processo de produção. [18]

A Figura 27 apresenta de forma resumida, o modo como algumas espumas comerciais metálicas são produzidas. [19]

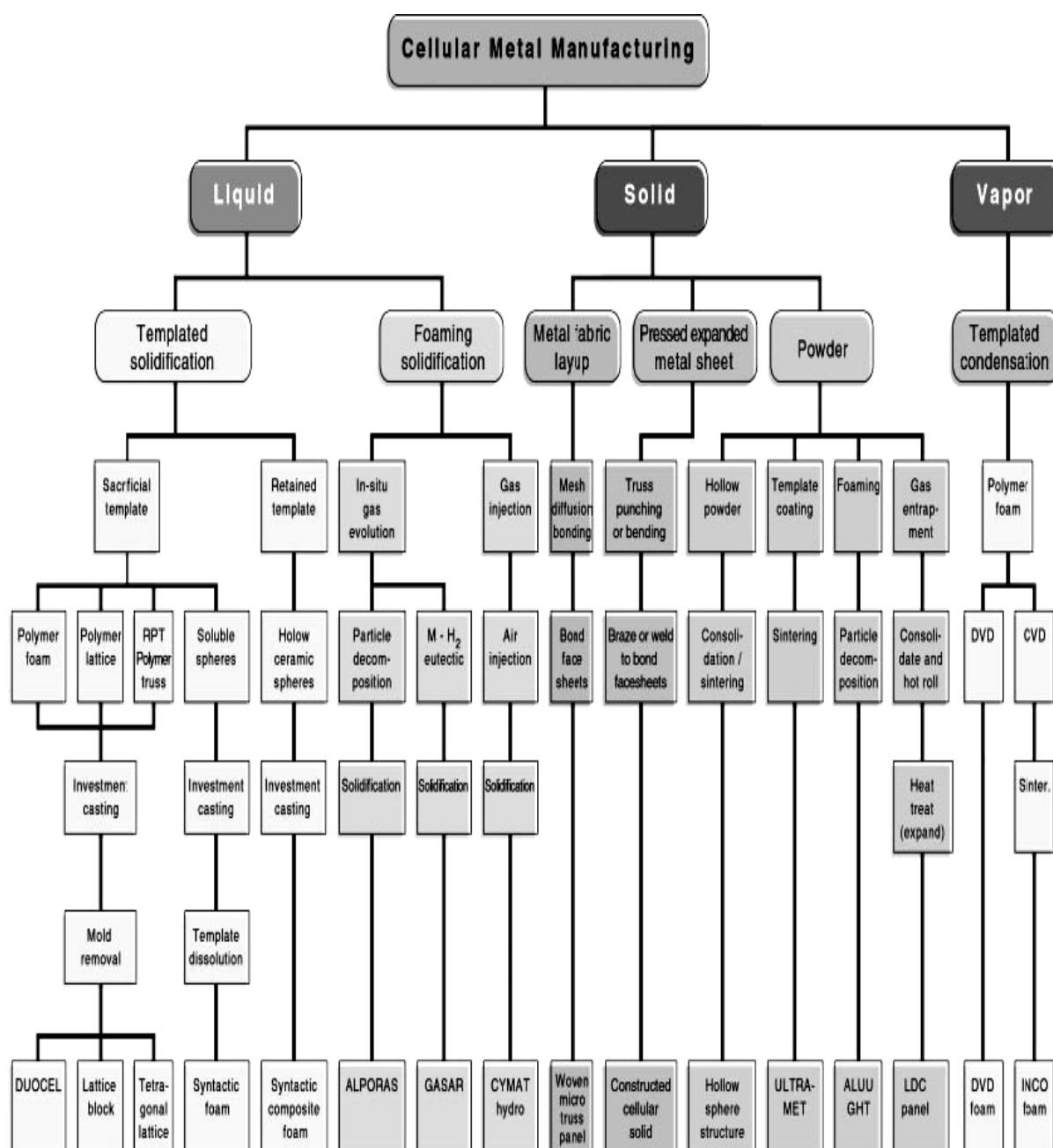


Fig. 27 Classificação de algumas espumas metálicas e suas designações comerciais. [19]

As espumas são agrupadas pela sua densidade relativa ou porosidade (a porosidade é medida pela densidade relativa). Na Figura 28A apresenta-se a relação entre o tamanho da célula obtida e a sua densidade para diferentes processos de espumas

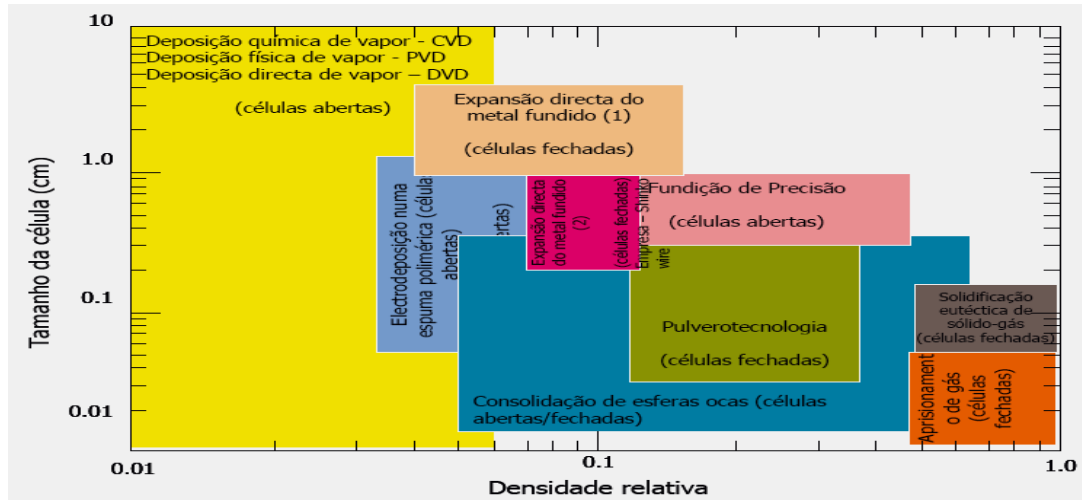


Fig. 28A Comparação entre porosidade e tipo de obtenção da espuma.

2.3 - Caracterização Mecânica das Espumas

Esta secção descreve as propriedades mecânicas na forma algébrica que é um elemento importante de análise e que permite efectuar avaliações e previsões quanto à forma como o material se poderá comportar, e que caracterizam as espumas metálicas.

2.3.1 - Propriedades Mecânicas das Espumas

Algumas das propriedades das espumas de alumínio, como o módulo de Elasticidade, tensão de colapso plástico, a condutividade térmica e eléctrica, etc., podem ser calculadas por intermédio da densidade aparente ou densidade relativa do componente/corpo na forma de espuma de acordo com um factor de conversão que relaciona o corpo na forma não densa e a mesma forma mas em material denso através da relação do tipo [23]:

$$\text{Property}_{\text{Foam}} = \text{Constant}_{\text{Property}} * \left(\frac{\rho_{\text{foam}}}{\rho_{\text{solid}}} \right)^n \quad (1)$$

em que n e $\text{Const}_{\text{Property}}$ são propriedades relativas a cada grandeza (Módulo Young, Tensão normal...) em estudo e $\text{Property}_{\text{Foam}}$ representa a propriedade para a espuma, ρ_{foam} é a densidade do material em estudo ρ_{Solid} a densidade do mesmo material do corpo na sua forma densa. [23]

Outra forma válida teórica semelhante pode ser atribuída pela equação:

$$\frac{K}{K_s} = z \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^t \quad (2)$$

As constantes z e t são parâmetros que dependem do tipo de estrutura da espuma e eventualmente a dimensão do seu poro e também do tipo de propriedade em causa. Estes valores são determináveis e existem na forma de tabelas [24], [38], K “Espuma” e K_s “sólido” são as propriedades em estudo (Módulo Young, Tensão normal...)

Será de salientar contudo, que a relação de parâmetros, originalmente foi concebida para espumas de polímeros, de poro regular e uniforme. Porém, as espumas de alumínio são dramaticamente diferentes das espumas de polímeros. As espumas de polímeros geralmente têm uma micro estrutura regular, ao contrário as espumas metálicas são altamente desordenadas com uma elevada dispersão de tamanhos de poro e a respectiva forma que detém na estrutura da espuma difere muito. Além disso, existem muitas imperfeições na estrutura celular da espuma, como rachas, fissuras ou buracos, etc.

Se estas particularidades não são levadas em consideração e as propriedades da espuma só são caracterizadas na relação algébrica da densidade aparente, então a grandeza algébrica irá definir um limite superior das propriedades esperadas. Adequadamente, as propriedades da espuma deveriam ser preditas por métodos estatísticos que usam uma função de distribuição satisfatória e capaz de caracterizar o material a estudar. [24]

A porosidade é uma das características mais importantes das espumas e é um parâmetro que afecta as suas propriedades, pode-se definir como o número de poros por polegada quadrada caso seja possível a determinação dos poros ou então a densidade relativa que se expressa em percentagem. A Figura 28B ilustra espumas com várias porosidades e respectiva densidade relativa.

De um modo geral as espumas apresentam baixa densidade acompanhada de baixa resistência mecânica (da ordem de 1MN/m^2) e um módulo de Young (da ordem de 10^2MN/m^2), a orientação dos poros (ver Fig.s 29 e 30) e o material de que são feitas as espumas são complementos para as propriedades físicas que detem. Contudo a densidade relativa será das várias propriedades dos materiais porosos a de maior destaque e a que deve ser avaliada com algum rigor.

Para efeitos de estudos analíticos considera-se a massa volúmica do material denso (material da espuma metálica) da liga em ensaio como tendo a massa volúmica do Alumínio $\rho = 2712 \sim 2700 \text{ kg/m}^3$

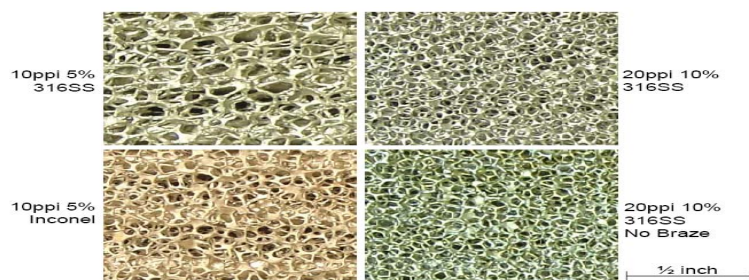


Fig. 28B Vários tipos de espuma de poro aberto distintas pelo poro e cor em função do material que as compõe.

As propriedades físicas da estrutura celular (ou corpo poroso) e a sua densidade relativa após fabrico determinam se é classificada como uma espuma. O parâmetro mais importante neste relatório que caracteriza um material poroso para efeitos de SFL é sua densidade relativa. A densidade relativa é definida como ρ/ρ_s . A propriedade ρ é a densidade (ou massa volúmica) do sólido celular (sólido poroso), e ρ_s é a densidade (ou massa volúmica) do material que compõe esse sólido.

A densidade relativa é ainda a razão da massa desse sólido poroso dividida pelo massa se o corpo poroso fosse maciço sendo o material o mesmo para ambos os corpos.

2.3.2 - Comportamento das Espumas à compressão

As espumas quando submetidas a uma força compressiva apresentam, um comportamento tipificado, que é possível de ser avaliado numa abordagem teórica. Os resultados apresentados neste trabalho são de várias fontes, que recolheram resultados laboratoriais por meio de ensaios compressivos registando a curva de tensão/força versus deformação (deslocamento).

Pode-se afirmar que as espumas, independentemente do material de que forem feitas, exibem um comportamento universal, na deformação que é possível de teorizar. Quando se comprime um provete de ensaio e medindo-se a força versus a deformação deste, sucede-se um aumento inicial na curva de tensão/deformação apresenta um comportamento linear, continuando a deformação segue-se então uma mudança, inicia um regime de deformação plástico caracterizado por um declive pequeno na curva de deformação (tensão/deformação), em alguns casos a curva assume uma orientação na horizontal (patamar). Por vezes ocorre um pico quase instantâneo voltando de imediato ao patamar após a recta inicial. Continuando a deformação e após ultrapassar o patamar de tensão/deformação a curva inicia uma mudança gradual e crescente na tensão, o regime apresentado pela curva tensão/deformação aumenta subitamente, inicia-se o processo de densificação (a densidade relativa aproxima-se do valor 1 “material totalmente denso”), este fenómeno ocorre porque as paredes dos poros das espumas tocam-se fazendo com que os poros desapareçam, o que obriga ao aumento crescente numa forma exponencial da curva

tensão/deformação, ou seja a taxa de aumento da tensão aumenta consideravelmente para uma deformação cada vez menor.

Ainda existe um outro parâmetro a considerar, a orientação da espuma ou como esta foi formada é relevante, a Figura 29 explica este facto.

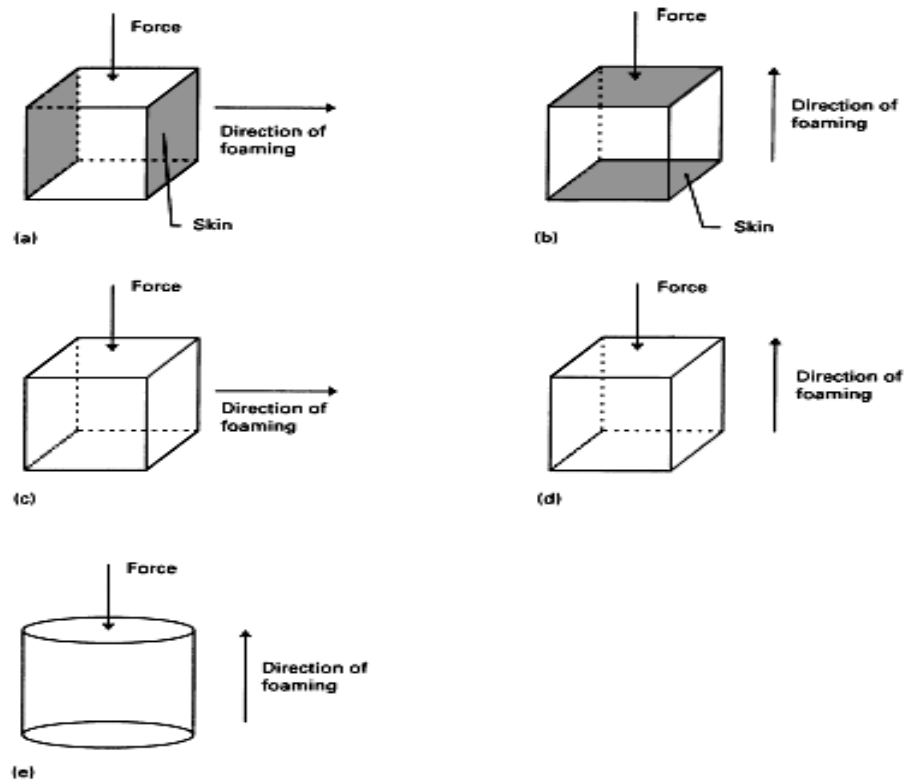


Fig. 29 Montagens possíveis, para ensaio de esmagamento de acordo com a orientação de poros da espuma. [20]

Na Figura 30 apresentam-se os gráficos tensão-extensão para espumas de Alumínio, ilustrando o efeito da direcção de compressão na resistência mecânica das espumas

É possível desta forma definir um comportamento típico que se enquadra às espumas metálicas quando sujeitas a efeitos de compressão, a Figura 30 [20] apresenta esse comportamento

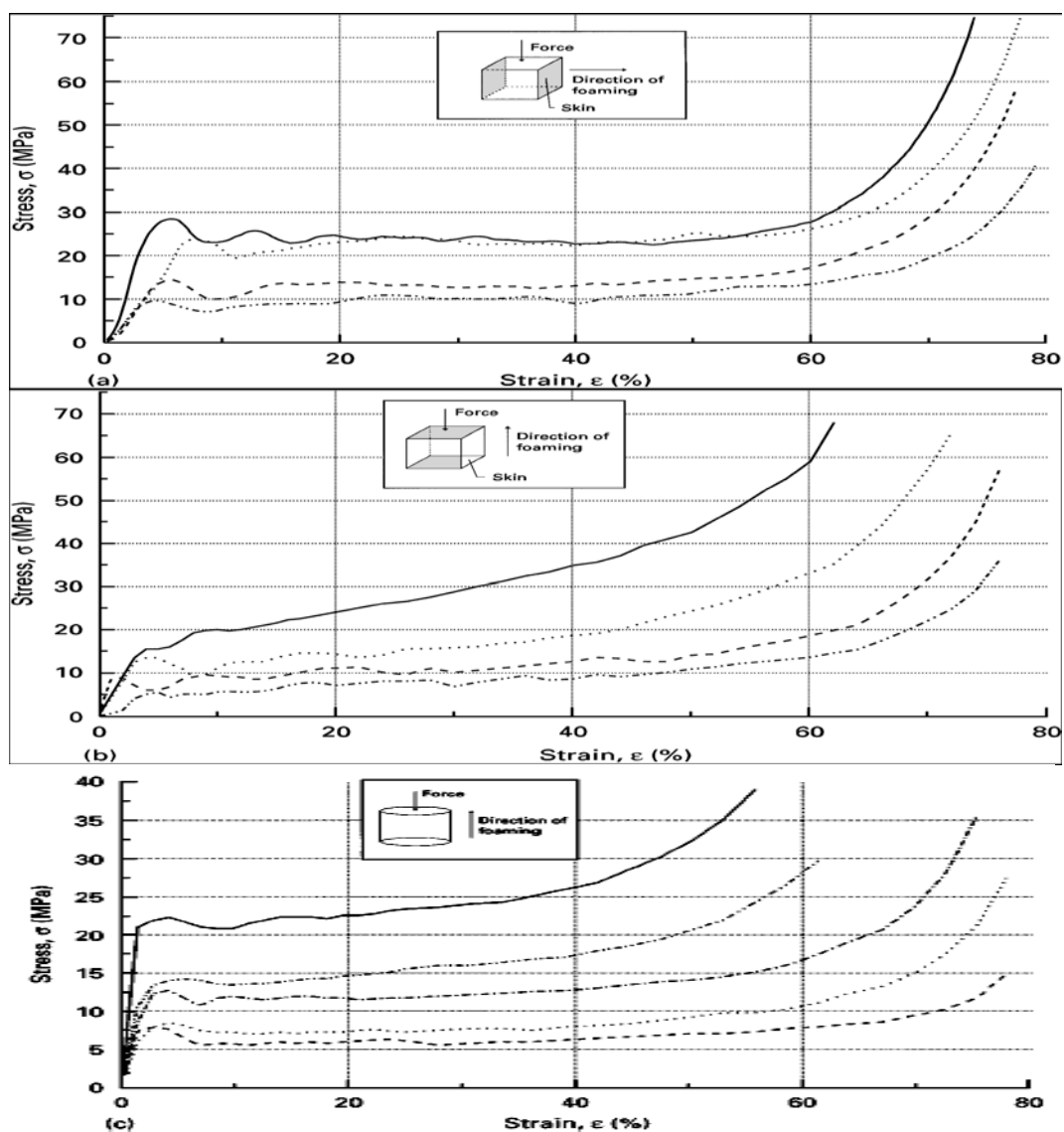


Figure 7 Stress-strain diagrams: (a) Al-6 wt % Si-4 wt % Cu oriented as in Fig. 6a (---), $\rho = 0.39 \text{ g cm}^{-3}$; (---), $\rho = 0.44 \text{ g cm}^{-3}$; (.....), $\rho = 0.54 \text{ g cm}^{-3}$; (—), $\rho = 0.58 \text{ g cm}^{-3}$; (b) Al-6 wt % Si-4 wt % Cu oriented as in Fig. 6b (---), $\rho = 0.35 \text{ g cm}^{-3}$; (---), $\rho = 0.42 \text{ g cm}^{-3}$; (.....), $\rho = 0.49 \text{ g cm}^{-3}$; (—), $\rho = 0.70 \text{ g cm}^{-3}$; (c) Zn-4 wt % Cu oriented as in Fig. 6c (---), $\rho = 1.04 \text{ g cm}^{-3}$; (.....), $\rho = 1.14 \text{ g cm}^{-3}$; (---), $\rho = 1.38 \text{ g cm}^{-3}$; (---), $\rho = 1.55 \text{ g cm}^{-3}$; (—), $\rho = 1.95 \text{ g cm}^{-3}$.

Fig. 30 Curvas tensão-extensão em compressão. [20]

A Figura 31 representa de forma teórica o comportamento da espuma à compressão

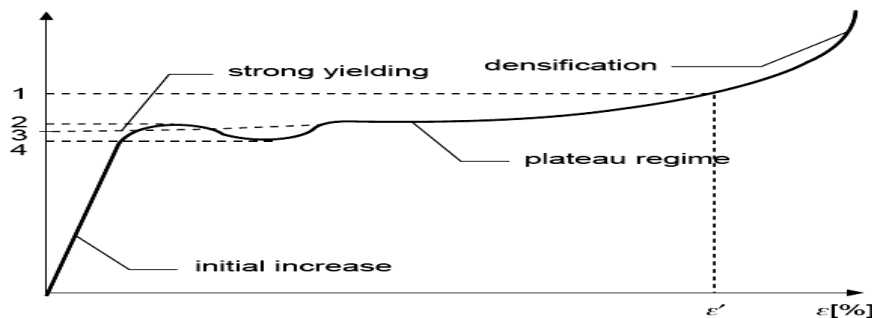


Fig.31 Representação teórica do comportamento de uma espuma à compressão. [21]

Os números apresentados demarcam etapas no processo de compressão. O ponto 1, apresenta um aumento exponencial da tensão resultante da força compressiva numa determinada fase do deslocamento na estrutura da espuma; 2, inflexão instantânea superior (pico que antecede patamar) tensão máxima; 3, linha extrapolada da tensão que define patamar tensão deformação; 4, inflexão instantânea inferior, tensão mínima no patamar.

A maior parte das espumas metálicas, na zona do patamar da curva de tensão/deformação apresenta uma amplitude de aproximadamente 10-50% da curva onde a deformação (deslocamento) é definida em percentagem. Nesta região da curva de Tensão da Espuma metálica, a espuma exibe colapsos dos poros até que o espaço ocupado pelo poro fique totalmente fechado (ocupado), então essa região, a denominada de densificação da espuma descreve a espuma como se tratasse de um metal sólido. A tensão de densificação define a tensão no ponto onde a tensão aproximasse a uma linha vertical.

Uma propriedade característica das espumas metálicas, que é a capacidade de absorção de energia, neste caso em particular a capacidade de absorver a energia de uma acção mecânica sem que seja transferida a totalidade dessa energia. Uma boa parte da energia mecânica da deformação é absorvida pelo colapso dos poros da espuma, o que faz então destas estruturas um excelente agente de absorção da energia de impactos, as deformações causadas por esses impactos são parcialmente dissipados no patamar da curva tensão/deformação (deslocamento interno da espuma) até que se atinja o ponto de início da densificação, fase em que a energia do impacto começa a ser transferida e não mais dissipada na espuma.

Quando são usadas espumas metálicas em aplicações estruturais, normalmente a escolha lógica é a espuma de poro fechado. A espuma de poro fechado é regra geral mais rígida quando comparado com a espuma de poro aberto com a mesma densidade, mas isto não permite concluir que as espumas de poro fechado absorvam mais energia na forma de tensão interna gerada na espuma. Contudo se é pretendido dar rigidez estrutural, e que esta

fique com a capacidade de absorver a energia de uma acção mecânica não desejada que possa causar danos indesejados numa estrutura, deve ser escolhido o poro fechado.

A Figure 32 apresenta a diferença de comportamento entre a espuma de Alumínio de poro aberto e a espuma de alumínio de poro fechado. A área definida na parte inferior da curva de tensão/deformação representa a quantidade de energia absorvida pela espuma. É bem claro que a espuma de poro aberto tem a capacidade de absorver mais energia; este facto é consistente até uma deformação na ordem dos 20% da deformação (extensão) interna da espuma. A espuma de poro aberto atinge valores mais elevados de tensão interna.

É fácil verificar que a área gráfica é maior permitindo de imediato concluir que o poro aberto é mais deformável permitindo maiores tensões acumuladas, mas que não será obrigatoriamente a solução ideal porque poderá tornar a espuma menos rígida, parâmetro importante numa estrutura.

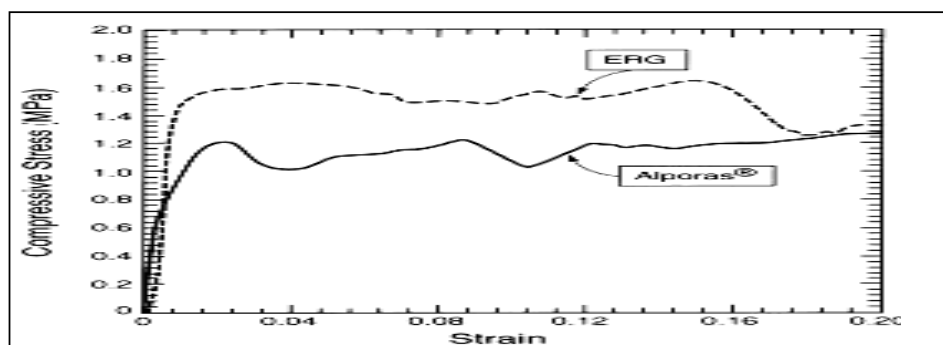


Fig. 32 Ensaio de compressão de duas espumas de alumínio, uma de poro aberto (ERG) e outra de poro fechado (Alporas) de densidades idênticas. [18]

Continuando a avaliação teórica do comportamento das espumas metálicas e tendo uma compreensão mais rigorosa das Figuras 30 e 32, vê-se que efectivamente o patamar não é bem na boa verdade um patamar mas sim antes, uma linha quase horizontal com uma acentuada irregularidade, que por simplicidade teórica é imaginada quase que perfeitamente na horizontal. A Figura 31 tenta aproximar esse comportamento a um modelo teórico onde existe uma suave irregularidade até o ponto de densificação.

É então agora que se deve apresentar uma explicação teórica do comportamento irregular do patamar. Quando se inicia a compressão das espumas inicialmente estas tem um comportamento linear como se fossem elásticas e é possível determinar o módulo de Young, (zona apresentada na Figura 33 por Elastic este gráfico é real de uma marca comercial).

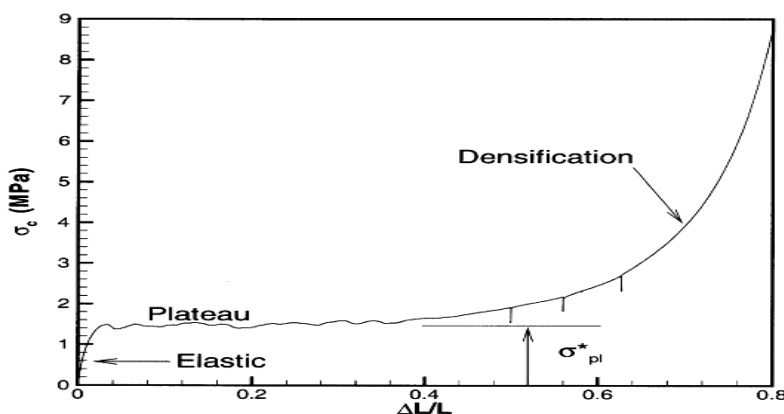


Fig. 33 Forma típica das espumas alporas à compressão. [22]

As oscilações observadas nos patamares nas Figuras 32 e 33 representam o colapso das paredes dos poros das espumas; os poros ao iniciarem o colapso estrutural, absorvem a energia da acção mecânica e consequentemente o aumento da curva de tensão/deslocamento é gradual como se pode observar. A forma da oscilação da linha de patamar é justificada pelo colapso de faixas de poros associados, por outras palavras inicia-se o colapso em massa de forma progressiva de faixas compostas por vários poros.

2.4 - Aplicações tecnológicas das espumas metálicas

Estes materiais têm diversas aplicações industriais e comerciais. Uma das propriedades mais interessantes é a capacidade de absorver energia seja de origem mecânica por contacto de corpos ou vibrações mecânicas onde estão incluídas as vibrações causadas pelo som, na absorção de energia térmica ou na sua transferência, e numa muito recente descoberta de muito elevado valor acrescentado em plena fase de pesquisa, as espumas metálicas tem revelado uma capacidade de barramento a radiações electromagnéticas muito importantes. É ainda um excelente material para a construção de estruturas que formam edifícios ou máquinas devido a sua resistência mecânica e leveza. Tem ainda revelado excelentes propriedades no controlo de fluxos de líquidos ou gases, concretamente a filtragem ou abafadores/difusores de fluxos. Outro grande destaque que tem vindo a ser dado tem a ver com a possibilidade de reciclar as espumas. Tem ainda utilização na indústria química em eléctrodos de baterias. Indústria dos transportes, e Indústria Biomédica nomeadamente em instrumentos cirúrgicos, prótese vertebrais, ossos, e raízes de dentes.

A possibilidade de ligar estes materiais permitiria desenvolver produtos mais complexos e potenciar novas aplicações.

2.4.1 - Órgãos de máquinas

Em muitos componentes de máquinas, como motores ou órgãos de máquinas, electrodomésticos sub sistemas de outro sistema será interessante que sejam fabricados em materiais leves e resistentes mecanicamente como também capazes de suportar temperaturas. Os metais mais concretamente na forma de espuma representam uma abordagem barata para a resolução do problema.

Na Figura 34 demonstram-se alguns componentes



Fig. 34 Órgãos de máquinas. [26]

2.4.2 - Reforço interno de componentes

Na linha dos componentes de máquinas e ou estruturas tem sido feito um esforço de combinar materiais densos com as espumas na forma de Sandwich, a superfície terá um metal denso e o interior é preenchido por uma espuma metálica o que confere duas resistências, a do material denso na superfície reforçada pelo interior com espumas menos densas mas também resistentes. Conseguindo-se desta forma componentes muito mais leves e com uma resistência apreciável. Na Figura 35 é apresentado um painel Sandwich usado pela BOEING [27] capaz de conferir um elemento estrutural que pode fazer parte da fuselagem ou propriamente do revestimento interior da aeronave, ou ainda de forma a permitir construir habitáculos no interior da aeronave.



Fig. 35 Painel Sandwich, alumínio e espuma de alumínio segundo o NPL (National Physical Laboratory). [27]

Ainda na perspectiva do reforço interno e sem focalizar apenas nos painéis Sandwich, muito importantes em que a sua aplicação não se resume apenas à indústria aeronáutica, existem outras componentes muito interessantes que seguem a mesma filosofia do reforço interno, com clara intenção da diminuição do peso e com elevadas possibilidades comerciais; e por terem surgido novos métodos de fabrico que são economicamente viáveis, permitem que no final de vida destes componentes exista a oportunidade de reciclar estes materiais. Surge na primeira linha uma aplicação, a aeronáutica e a indústria Aero Espacial.

Nos motores a jacto da aeronáutica comercial/militar, na parte dianteira da zona anterior ao compressor mais propriamente a FAN dos motores jacto turbofan uma importante aplicação encontra-se ainda em estudo e já com resultados concretos comercialmente (Motor v2500 que equipa o A320). As palhetas da FAN apresentam uma nova aplicação possível e curiosa das espumas, além do reforço mecânico interno que a espuma lhes confere, estas fazem com que a palheta seja mais rígida e seja possível reduzir a sua massa, como consequência imediata pode ocorrer a diminuição de efeitos de ressonância (as palhetas são esbeltas e longas) e maior estabilidade nesta zona do motor com a redução do peso deste [28], esta possibilidade foi discutida em estudos apurados no NASA Glenn Research Center em placas de Sandwich com um material denominado por aerospace-grade stainless steel 17-4PH uma forma de aço inoxidável por ser mecanicamente interessante e permitir a produção das palhetas da FAN (dos motores jacto turbo fan) por processos de pó metálico, processo este capaz de produzir espumas do tipo 17-4PH 80PPI. A Figura 36 apresenta o painel Sandwich seccionado num ensaio que foi realizado. As duas faces mais claras são de material denso respectivamente o topo e fundo da imagem o material na forma de espuma é o interior e é a parte escura da imagem. [29-30].



Fig. 36 Secção Painel Sandwich.

Na mesma filosofia da forma Sandwich, ou seja, o reforço interno por espumas, surgem outros componentes que na realidade parecem uma Sandwich mas que se obtém de forma diferente.

A Figura 37 apresenta uma forma mais elaborada do princípio Sandwich para construir um órgão pertencente à estrutura de um veículo, esta técnica permite obter elementos estruturais resistentes e leves.



Fig. 37 Órgão estrutural de um veículo usando o princípio da Sandwich. [31]

Outra forma estrutural do reforço interno por espuma metálica pode ser visualizada na Figura 38.



Fig. 38 Componente de uma estrutura com reforço interno. [32]

Esta tecnologia apresenta grandes vantagens em termos de preservação do meio ambiente e reciclagem. Todos estes componentes no final de vida podem ser reciclados.

2.4.3 - Elementos perfilados para estruturas

Pelos métodos de fabrico apresentados anteriormente podem-se obter perfis, ou então fabricar os perfis convencionais em I, H, L, IPN, etc. A Figura 39 apresenta dois elementos perfilados para uso na construção de uma estrutura, esta tecnologia beneficia em muito a construção civil uma vez que edifícios que antes seriam impensáveis, podem ser realidade, a leveza da estrutura que pode ser um critério a considerar em certos aspectos, e por vezes uma remodelação estrutural de um edifício torna-se possível quando por limitações de peso anteriormente não seriam possíveis.



Courtesy of F Simancik

Fig. 39 Perfis em espuma metálica para uso na construção de estruturas. [33]

2.4.4 - Amortecimento do impacto

As espumas por serem materiais porosos podem, dissipar de energia mecânica indesejada como a de uma colisão frontal de um veículo com um obstáculo. As espumas são capazes de absorver alguma dessa energia sem a transferirem, suavizando desta forma o efeito indesejado de uma aceleração brutal e destrutiva, e no caso de transporte de pessoas estas acelerações podem revelar-se letais.

Se um projectil ou corpo animado com uma elevada energia cinética em colisão com o veículo, estrutura ou parte integrante da estrutura que proteja humanos, poderá fazer a diferença se esta tiver um papel de uma blindagem, a deformação da espuma poderá efectivamente dissipar uma boa parte dessa energia e quando a deformação da espuma atingir a densificação, a espuma deixa de ser porosa não dissipando mais a energia, sendo essa a altura em que a espuma deixa de funcionar como blindagem amortecedora. Recordando o comportamento à compressão de espumas; a ERG Materials Aerospace Corporation fabricante de espumas apresenta o comportamento típico das espumas que fabrica caracterizado por um gráfico comercial na sua página da Internet, representado na Figura 40. [34]

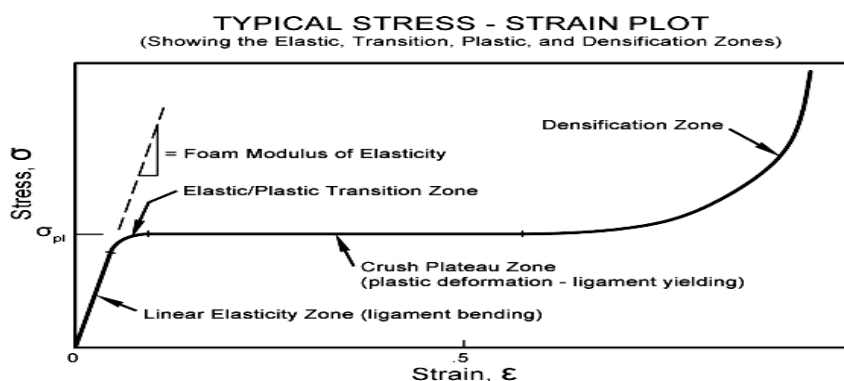


Fig. 40 Curva típica de compressão das Espumas ERG. [34]

A Figura 41 apresenta um painel Sandwich capaz de resistir ao impacto a, sua viabilidade como fuselagem ou blindagem de protecção é elevada tornando mais leve a estrutura que protege a área de interesse. [35]

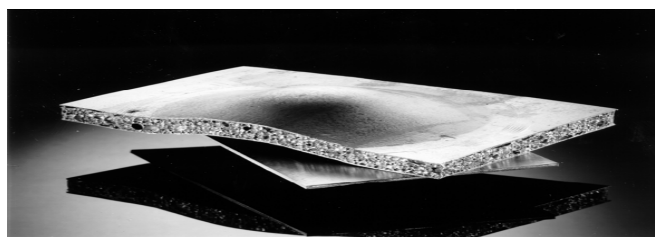


Fig. 41 Painel Sandwich aplicável como blindagem. [35]

Existem diversas patentes de blindagens leves e resistentes que formam painéis de espumas metálicas. [36]

As espumas estão ainda num estado muito avançado para aplicação no Space Shuttle, a protecção do tanque principal contra objectos que se soltem durante a fase de descolagem, nesta fase em que o tanque e foguetes auxiliares têm de se separar do veículo espacial tem-se revelado comprometedoras. As espumas vão substituir uma banda de chumbo que protege o veículo e por motivos ambientais e peso não satisfazem os elevados requisitos de viagens para o espaço sideral. [37]

2.4.5 - Indústria Química

Esta área da acção da ciência é vasta, existem muitas soluções que resultam desta ciência que são importantes para a actividade humana, as espumas pelas propriedades que lhes tem vindo a ser atribuídas, apresentam um papel muito activo nas soluções tecnológicas em que participam nomeadamente:

1 – Eléctrodos ou colector de corrente, qualquer processo electroquímico depende muito da área de contacto caso um dos reagentes se encontre numa fase diferente do outro reagente, isto equivale a falar dos eléctrodos das pilhas em particular as pilhas de hidrogénio (ou pilha de combustível) que com o forte desenvolvimento que tem vindo a sofrer outras formas de combustível tem vindo a ser encontradas em particular o metanol combustível líquido, mais fácil de manusear e de encontrar que o Hidrogénio que se caracteriza por um gás de difícil manuseio. Ainda Nas pilhas de Hidrogénio difusores de fluxos são essenciais para a promoção da difusão de reagentes de forma a aumentar o rendimento da reacção. [39-42]

A Figura 42 apresenta a montagem construtiva de uma pilha de combustível onde os colectores de corrente são de espuma metálica, o rendimento apresenta-se superior com colectores de espuma metálica. [39], [40],

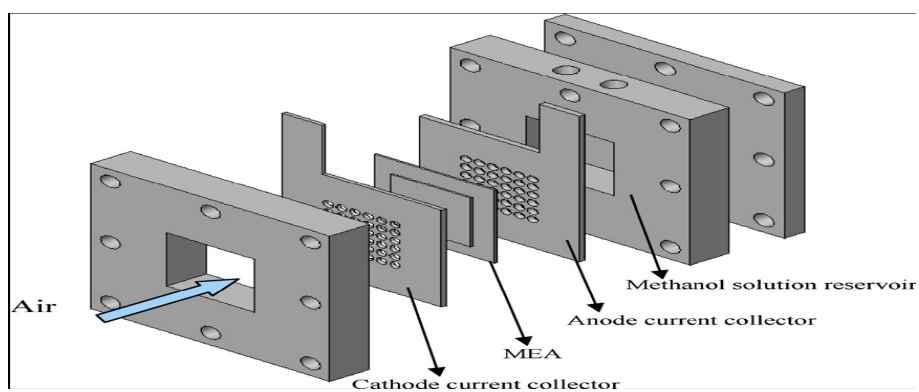


Fig. 42 Pilha de Combustível, MEA - Membrane and Electrode Assembly. [40]

A Figura 43 apresenta a pilha DMFC-direct methanol fuel cell com uma MEA revestida por espuma metálica como difusor da passagem de ar. [41-42]

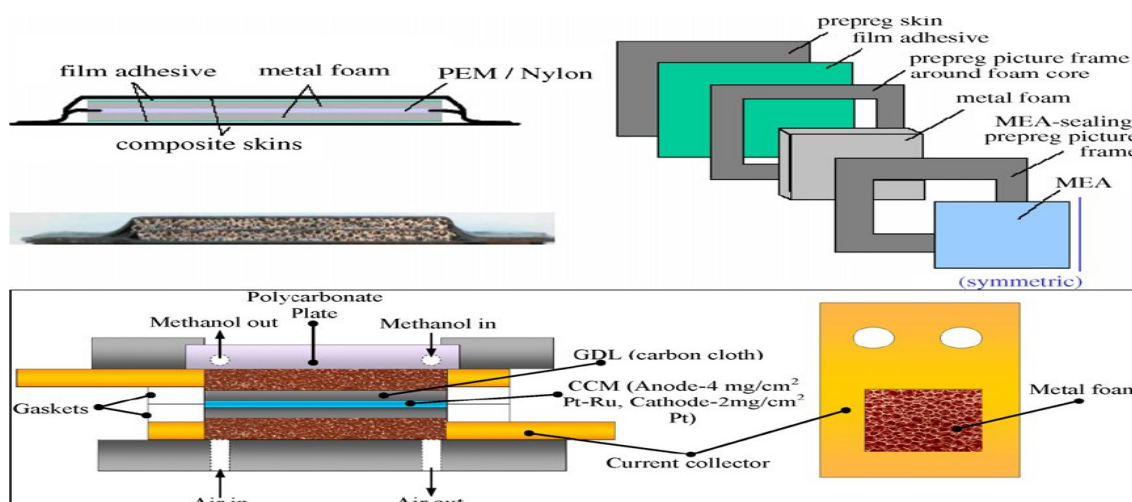


Fig. 43 Pilha de Combustível com membrana difusora de Espuma metálica. [39]

As Baterias tem também vindo a ser avaliadas em termos de eléctrodos de espumas metálica, à semelhança das pilhas de combustível a área é o ponto-chave, esta solução beneficia muito veículos eléctricos ou híbridos, estas baterias são mais leves e apresentam um poder de resposta sob solicitação superior ao eléctrodo convencional. [43]

2 – Filtros, para fluidos no estado líquido e estado gasoso, é possível efectuar a filtragem nos líquidos de destaque a purificação de água, nos gases a purificação do escape dos motores que deixam desta forma de libertar para a atmosfera poluentes graves, para o caso de combustível na forma de óleos pesados a tendência é a libertação de partículas pesadas muito poluidoras como as libertadas pelo Diesel. A Figura 44 apresenta uma solução desenvolvida pela KIMM em termos de filtros e/ou catalizadores para veículos industriais. [45]

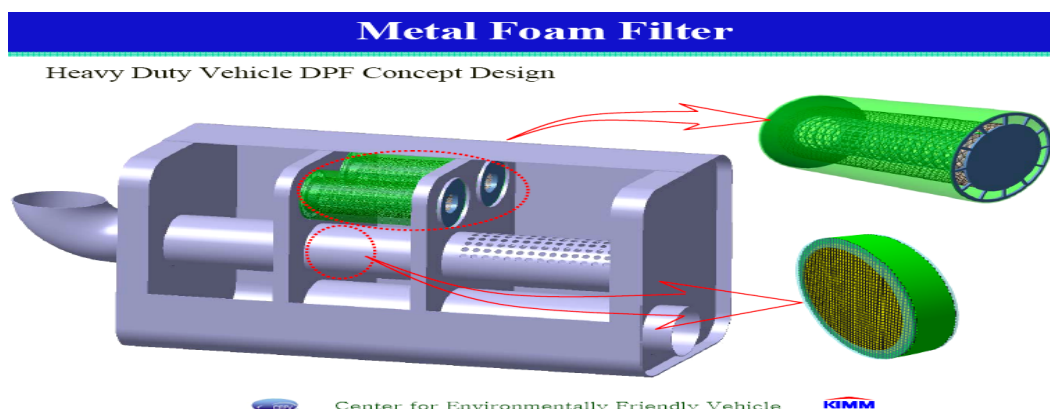


Fig.44 Filtro para o escape de veículos Diesel para reduzir emissões de CO e partículas pesadas altamente poluentes para atmosfera. [45]

Outros estudos sobre espumas sinterizadas têm tido um forte implemento no presente momento, na área de estudo incluem-se também outros motores sem que sejam os motores diesel, a Figura 45 exemplifica um método em estudo para catalizadores do escape de múltipla acção (acção por estágios): Oxi-Cat (oxidation catalyst), DPF (the particulate filter), SCR catalizador conversor de NO_x .

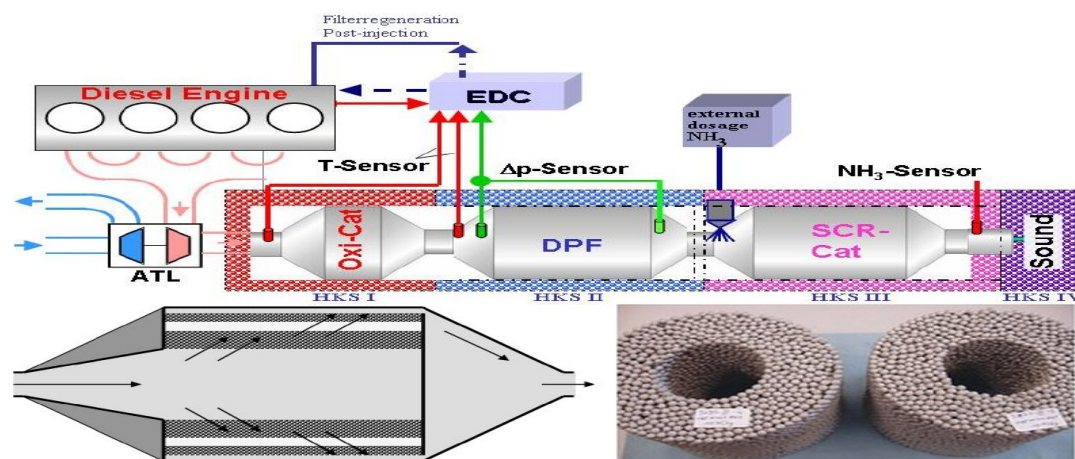


Fig.45. Proposta de montagem de filtro de escape de múltipla acção composto de Espuma metálica sinterizada. [54]

3— Permutadores de calor, esta área está a revelar-se extraordinária, as soluções encontradas para permutadores de calor permitiram o aparecimento de níveis de eficiência que não eram alcançados pelos métodos convencionais, de condutas e labirintos manufacturados por processos demorados e dispendiosos como é um permutador de calor aplicado a processos industriais eléctricos/electrónicos e motores. [46-48]

As espumas, tem apresentado uma importância decisiva, na elevação da eficiência de motores. O aumento da eficiência tem se revelado de duas formas economia de combustível ou no aumento considerável da prestação dos motores. Os motores onde se tem aplicado esta tecnologia são os motores de combustão interna convencionais (Ciclo Otto e Diesel) e também em turbinas jacto e/ou foguete para indústria aeroespacial no último caso.

Para o motor convencional um simples radiador para a refrigeração do motor torna-se menor mais barato na sua fabricação, mais leve e mais eficiente, a área de contacto à semelhança dos eléctrodos é aumentada pela porosidade da espuma metálica (sempre poro aberto). A Figura 45 exemplifica um permutador de ninho em espuma metálica e condutas internas de cobre, é ainda na perspectiva da boa condução térmica que se utiliza metais como o cobre para aumentar o efeito das espumas metálicas, concretamente permutadores de espumas de cobre, em particular equipamentos eléctricos/electrónicos. [49]

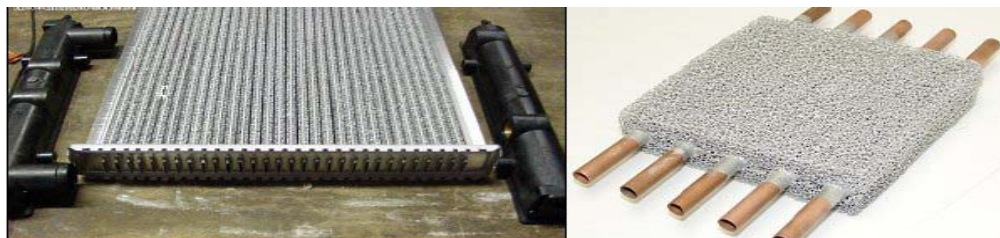


Fig.46 Radiador (m.pore) com ninho em Espuma Metálica (lado esquerdo), com detalhe construtivo (lado direito). [50]

Como consequência desta tecnologia surgem novos conceitos a aplicar ao funcionamento interno dos motores térmicos que indirectamente não envolvem permutadores externos mas sim internos ao motor que promovem a difusão de fluxo, apreçam assim conceitos de regeneração (**Regeneratively Cooled Systems**) e transpiração (**Transpiration-cooled Systems**) para arrefecimento de motores foguete de elevadíssimas prestações segunda a ULTRAMAT, baseados na tecnologia das espumas metálicas. [51]

Nos motores 4 tempos da mesma forma também um conceito em desenvolvimento com resultados concretos, apresenta a melhoria da eficiência energética do motor, este garante uma uniformização da combustão, aumentando a eficiência da combustão reduzindo assim os óxidos de azoto (NO_x) nefastos para a atmosfera e a regeneração da energia térmica dos gases da combustão para a mistura que entra no ciclo seguinte anterior à combustão, desta forma reduz-se um pouco as perdas térmicas pelos gases do escape. [52], [53].

A Figura 47 apresenta a técnica TDC que é um meio poroso para uma boa difusão.

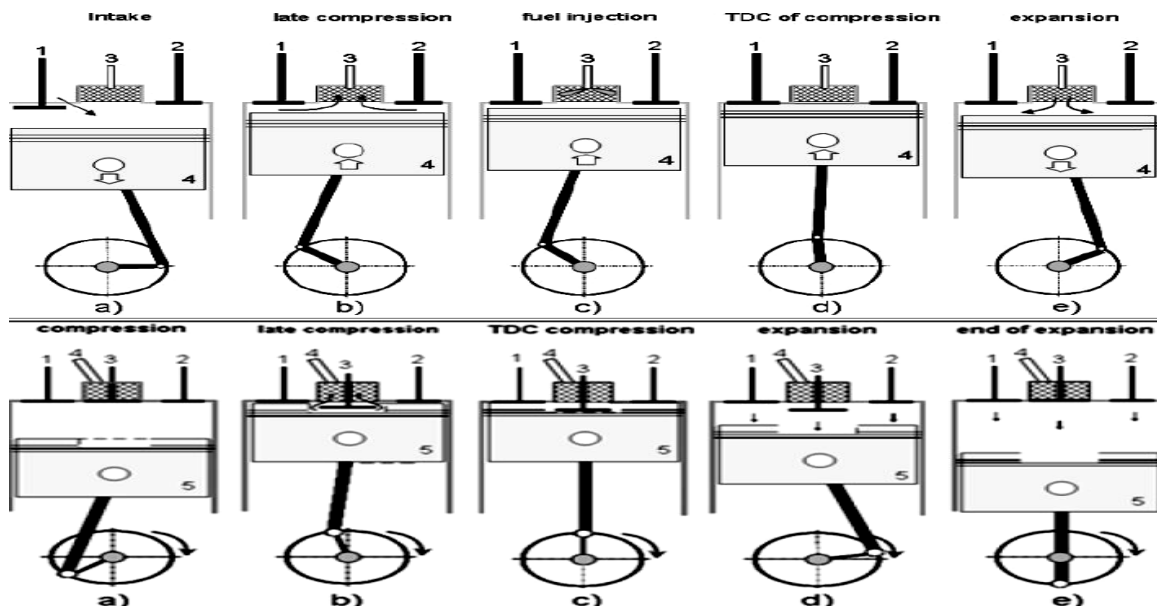


Fig. 47 Motor Diesel, nº4 tem câmara TDC -Top Dead Center aberta e Motor nº 5 tem a câmara TDC isolada por uma válvula. [48]

A tecnologia TDC resulta de dois conceitos desenvolvidos a referir:

- 1- Conceito PM motor Technology “PM - Porous Medium”
- 2- Conceito MDI motor Technology “MDI – Mixture Direct Injection”

Estes conceitos são aplicados directamente a um meio poroso (espuma metálica, ou cerâmica) como a Figura 48 apresenta uma espuma que pode ser metálica ou cerâmica.

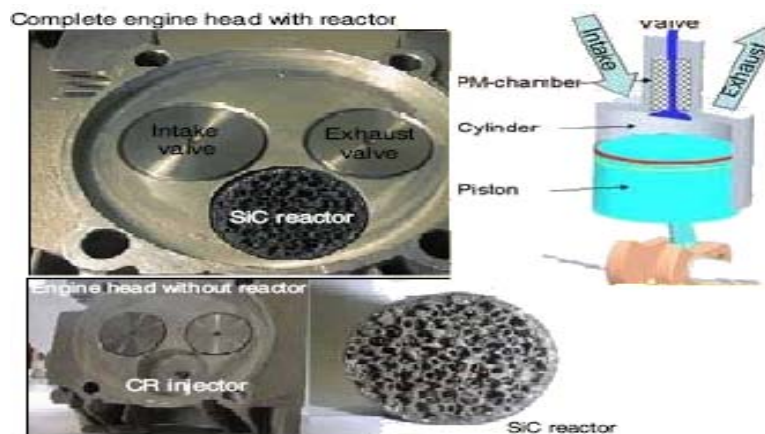


Fig.48 Protótipo de motor TDC com tecnologia PM, MDI. [53]

4 – Silenciadores e abafadores de faúlhas, são outra aplicação importante.

5 – Lubrificação, neste ponto destaca-se a retenção ou armazenamento e transferência de fluidos muito em particular lubrificantes de rolamentos, o lubrificante é retido na espuma e vai sendo libertado lentamente durante a vida do rolamento, a espuma é parte constituinte duma blindagem interna do rolamento que é porosa que contem o lubrificante e que vai libertando o lubrificante ao longa da vida deste.

6 – Queimadores e Catalizadores (difusores) de combustível e emissores de energia infravermelha como os aquecedores catalíticos, à semelhança dos permutadores a difusão do fluxo de fluidos térmicos ou químicos é fortemente fomentada e facilitada. [14], [55]

2.4.6 - Isolamento

O isolamento à energia, seja vibrações, energia sonora, térmica ou electromagnética, depende do tipo de espuma se poro aberto ou fechado, no poro aberto as espumas apresentam boas características condutoras térmicas, como também apresentam alguma capacidade de amortecimento (isolamento) ao som, depende do tamanho do poro, ou concretamente em função da sua densidade relativa, apresentam uma reacção de amortecimento do som que difere com a densidade relativa, este material é um excelente

complemento à construção civil, na construção de divisórias internas de edifícios ou habitáculos em viaturas, barcos, aviões e comboios, com a vantagem destes materiais serem resistentes ao fogo não combustíveis, recicláveis e leves com resistência mecânica apreciável. [56]

As espumas metálicas de poros fechados revelam ainda capacidades isoladoras muito interessante para radiações electromagnéticas, conseguem diminuir a energia radiante electromagnética tornando-as indicadas para protecção de aparelhagem electrónica sensível a interferências rádio eléctricas, como é o caso do poder de um telefone móvel interferir na aparelhagem de navegação de um avião ou outras situações comprometedoras, podem ser salvaguardadas e que estão em franco e pleno desenvolvimento actualmente a nível mundial à data de elaboração deste relatório (palavra chave EM Shielding). [57-58]

2.4.7 - Indústria Biomédica

Esta área tem revelado um forte desenvolvimento nos últimos tempos, uma vez que os processos de produção de espumas apresentam um franco desenvolvimento, essas técnicas são deslocadas para qualquer outra liga ou metal, ou mesmo materiais compósitos, cerâmicas e vidro. Estando o estado da arte em tamanho desenvolvimento, facilmente a indústria biomédica tira proveitos imediatos.

As próteses são um ponto de destaque, próteses dentárias são uma realidade, a Figura 49 apresenta uma prótese dentária em Espuma Metálica de Titânio.

A superfície áspera de um implante em espuma de titânio cria fricção entre o implante e o osso, permitindo assim o crescimento do osso que vai promover a fixação do implante no lugar pretendido "o interior do implante também tem espumas metálicas de forma a reduzir o peso do implante". A adesão do osso é mais rápida permitindo uma rápida recuperação. Na Figura 50 pode-se ainda ver outro tipo de implante, trata-se de um implante da cabeça do osso femoral.



Fig. 49 Prótese dentária. [59]

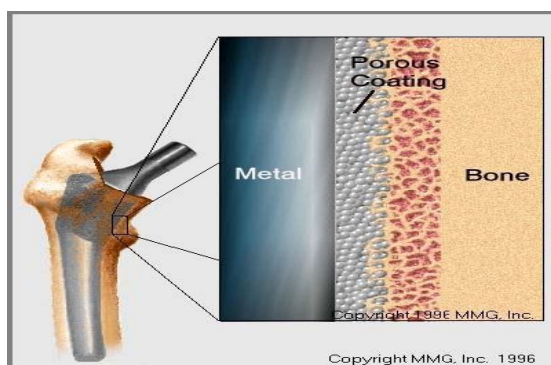


Fig.50 Implante da cabeça do osso Femoral revestido a Espuma Metálica.

Para finalizar o tema indústria biomédica falta referir que a instrumentação cirúrgica também tem sido alvo desta tecnologia, onde têm sido aplicadas as espumas com intenção de tornar mais leves os instrumentos metálicos entre outros benefícios.

Não existem limites para a evolução, a vontade humana determina os progressos, na data presente da composição deste relatório as possíveis aplicações encontradas por pesquisa foram enumeradas, muito provavelmente por segredo industrial militar e segurança nacional outras aplicações existirão ou em desenvolvimento e a decorrer na data presente, como já foi citado neste relatório. Contudo este relatório no final da introdução teórica das espumas pode resumir as suas aplicações na Figura 51 de forma muito genérica devido a grande aplicabilidade que as Espumas Metálicas têm revelado.

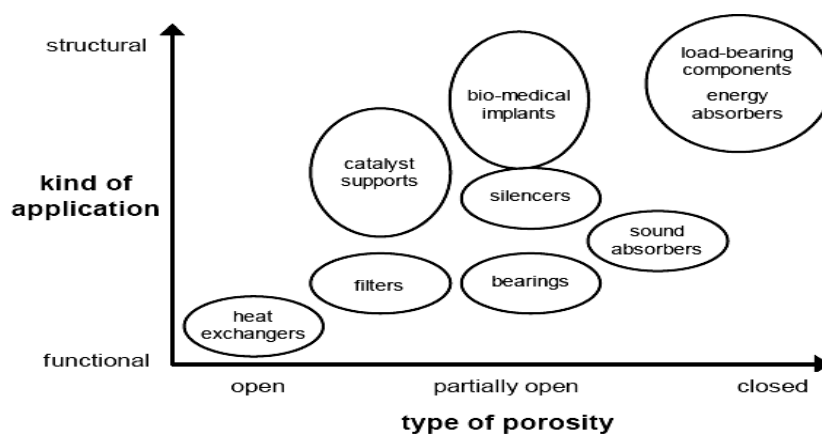


Fig. 51 Aplicações das Espumas Metálicas.

Por certo outras aplicações existiram mas lamentavelmente não disponíveis ao conhecimento académico civil, e impossíveis de enumerar no presente trabalho.

3. Processos de Ligação

Do exposto relativamente às aplicações industriais das espumas metálicas resulta claro que o conjunto das suas propriedades estruturais e mecânicas dificulta a união de componentes em espumas.

Existem alguns casos bem sucedidos de ligação por adesivos contudo a resistência mecânica das uniões coladas é relativamente reduzida pelo que se investigam outros processos.

A soldadura por fricção Linear é um processo que surgiu nos anos noventa do século XX, e que apresenta características potencialmente interessantes para unir estes materiais.

3.1 - Soldadura por Fricção Linear (SFL) definição do processo

A soldadura por fricção existe desde os anos sessenta mas foi em 1991 que o Prof. Wayne M. Thomas e sua equipa do The Welding Institute (TWI) patentaram o processo. Este difere dos processos de soldadura por fricção convencional por usar uma ferramenta de forma cilíndrica, animada de rotação e translação. Esta ferramenta apresenta um certo número de parâmetros a respeitar, que são: A penetração na interface dos corpos a soldar, ângulo do eixo da ferramenta com a linha perpendicular ao plano de soldadura, velocidade de rotação da ferramenta, velocidade de avanço e forças no eixo da ferramenta, estes parâmetros é que promovem localmente uma formação visco plástica das extremidades adjacentes dos corpos a soldar durante seu movimento ao longo da linha de interface dos dois corpos a unir. A ferramenta giratória é caracterizada por dois componentes base: um pino e uma base da ferramenta (Shoulder). A Figura 42 é um exemplo dos primórdios da Ferramenta de Soldadura por Fricção Linear (SFL), a Figura 53 apresenta a parametrização do processo SFL.

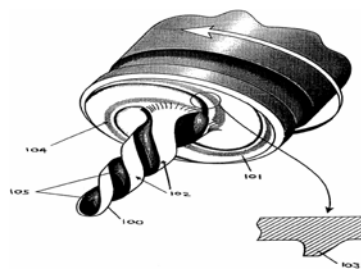


Fig. 52 Ferramenta SFL. [60]

- tool material
- shoulder diameter (\varnothing)
- pin geometry
- penetration (t)
- overlap (u)
- tilt angle (α)
- number of revolutions (n)
- feed speed, welding speed (v)

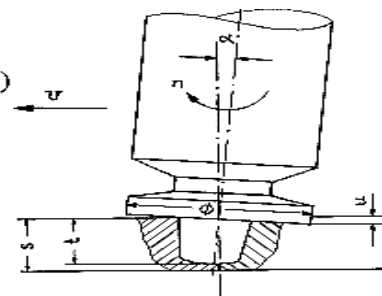


Fig. 53 Parametrização definidora do processo SFL. [61]

O processo de Soldadura por Fricção Linear envolve uma componente visco plástica na soldadura combinada com o forjamento. A acção mecânica e o calor gerado, são os factores em jogo, e que dependem de determinados critérios como o constrangimento dos corpos a soldar e a forma do equipamento. A ferramenta FSL avança entre duas placas (corpos) firmemente fixos à mesa do equipamento de soldadura de tal forma que a folga da interface seja a menor possível. A Figura 54 demonstra a forma como deverá ser a montagem mecânica do processo SFL.

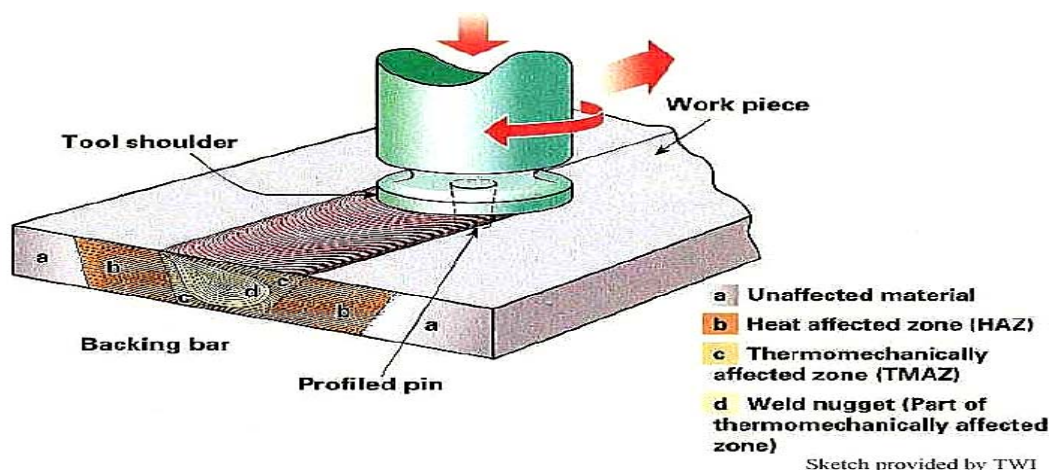


Fig. 54 Montagem de FSW - Friction Stir Welding (SFL). [62]

A ferramenta tem de estar animada de um movimento composto de rotação e de translação em simultâneo. A forma do pino actua como um agente de fricção e mobilizador de deformação plástica capaz de gerar um fluxo de material sem que este entre completamente num estado de fusão, fazendo com que o material se comporte como um fluido viscoso que vai formar a soldadura. A forma roscada ou outras formas que tenham as ferramentas tem efeitos distintos no transporte do material base em direcção à parte posterior ao movimento de avanço. O sholder bloqueia a tendência ascendente do fluxo de material “visco plástico” obrigando o fluxo a descender e a misturar-se, a acção do sholder assemelha-se a um efeito de forjamento e como tal exige uma força vertical.

Existe uma grande diversidade de ferramentas a usar. Contudo o princípio de funcionamento do processo é o descrito anteriormente.

A junção obtida apresenta tipicamente 4 zonas como estão representadas na Figura 55 esta imagem apenas é válida para ligas de Alumínio. É de salientar que o calor desenvolvido se deve ao atrito da ferramenta com o material e ao atrito interno resultante da deformação plástica do material

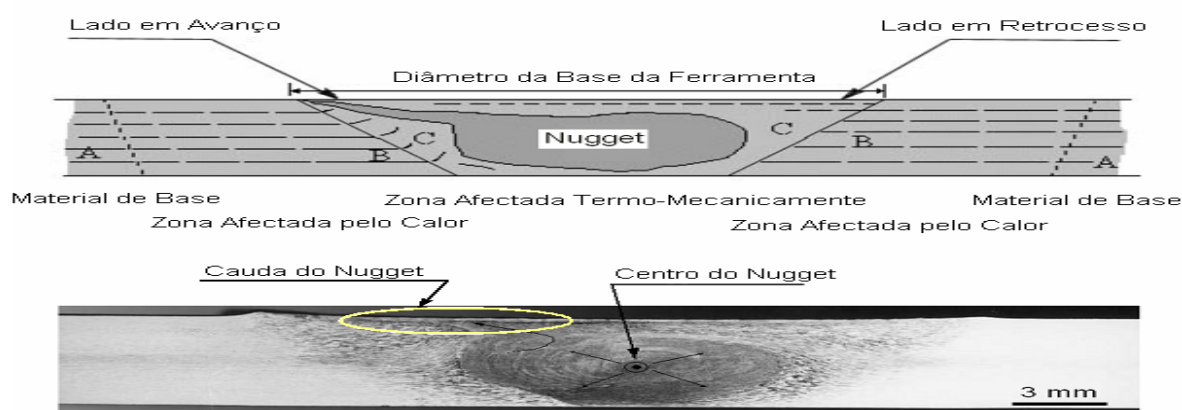


Fig.55 Caracterização metalográfica de uma secção transversal típica da SFL de ligas de alumínio. Imagem de topo Esquema genérico; Imagem inferior Macrografia resultante da SFL de uma liga AA7075. [63]

As zonas A, B, C Nugget da Figura 55 é o significado de:

1) Nugget: Zona central do cordão de SFL, sujeita a uma recristalização dinâmica. Esta recristalização é produzida pela acção dinâmica da deformação visco-plástica acoplada com o ciclo térmico do processo, que nesta zona, atinge os valores mais elevados, e resulta numa estrutura de grão tipicamente mais fino do que o grão do Matéria Base. É nesta zona que surgem os fenómenos de recristalização dinâmica.

2) Zona C - Zona Afectada Termo-Mecanicamente (ZATM): Nesta zona, a estrutura de grão original sofreu uma deformação plástica intensa, aplicada pela ferramenta de SFL, a quente, sem que tenha ocorrido uma distinta recristalização. Análises mais detalhadas mostram que existe formação de sub-divisão do grão, embora a estrutura alongada original se mantenha. Quanto à dureza apresenta-se superior ao mínimo registado para a ZAC, presumivelmente devido ao encruamento provocado pela deformação plástica. As micro estruturas nesta zona, são um indicador da extrema severidade do fenómeno de fluxo plástico do material em redor do pino, pois algumas micro estruturas bandeadas iniciais encontram-se flectidas de 90° e outras extremamente alongadas evidenciando os elevados níveis de extensões plásticas a que o material está sujeito, na vizinhança do pino. A fronteira entre esta zona e a zona central recristalizada dinamicamente, é bem distinta. Esta zona, é característica das ligas de alumínio, pois existem outros materiais que apresentam uma ZATM, totalmente recristalizada, sem a distinção entre esta zona e o *nugget*.

3) Zona B - Zona Afectada pelo Calor (ZAC): Nesta zona, o calor resultante da SFL provocou um envelhecimento ou recozimento da micro estrutura, embora não sejam visíveis alterações na micro estrutura. A dureza destas zonas não sofre variações importantes na soldadura de ligas endurecidas mecanicamente. Na soldadura das ligas endurecidas totalmente por envelhecimento, esta zona é tipicamente mais macia do que a micro estrutura

do material de base, sendo nesta região que normalmente se localiza o ponto de menor dureza, mais especificamente perto da interface com a zona afectada termo mecanicamente.

4) Zona A - Material de Base (MB) : Esta zona não sofreu qualquer alteração metalúrgica ou de resistência mecânica, como resultado do ciclo termo-mecânico de SFL, apresentando tipicamente um grão alongado evidenciando a direcção de processamento mecânico a que foi sujeita (ex: laminagem).

A cauda do nugget: Extensão do nugget junto da superfície superior do cordão, em direcção à periferia da base da ferramenta, no lado em avanço. Em termos visuais, numa secção transversal em relação à direcção de soldadura, esta cauda do nugget, resulta numa assimetria desta zona do cordão de SFL.

3.2 - Parâmetros Operatórios

São os seguintes os parâmetros operatórios de SFL

1 – Força vertical: Este parâmetro é importante, garante a posição da ferramenta (pino na junta de interface) na posição ideal, uma vez que este processo gera grandes esforços mecânicos, por ser um processo de fricção.

2 – Velocidade de avanço: Este parâmetro define a velocidade com que a ferramenta SFL deve progredir na junta de interface dos materiais a soldar. O seu correcto valor contribui significativamente na qualidade da junção.

3 – Rotação: Este parâmetro em conjunto com a velocidade de avanço participa na classificação da SFL. Este parâmetro tem um papel importante a desempenhar no fluxo de material “visco plástico”, é este que mobiliza o pino e base (sholder) em primeira instância na geração do fluxo de material.

4 – Ângulo de ataque da ferramenta: Este parâmetro é importante no processo SFL, o seu contributo complementar a acção do sholder da ferramenta, que é restringir a ascensão vertical do fluxo de material “visco plástico”.

5 – Posição do Pino: Este parâmetro define a posição na vertical na interface da junta definida pelos corpos a soldar, ajudará à penetração da soldadura.

6 – Tipo de ferramenta: É fundamental e determina a qualidade da junção. Deve ser seleccionada correctamente para o tipo de soldadura desejado.

7 – Relação de estabilidade ou a Razão entre Rotação e Velocidade de avanço da ferramenta " $\Omega_{(RPM)} / V_{(mm/min)}$ ": Este parâmetro poderá ter outra designação, contudo apresenta-se como uma razão aritmética entre o valor de rotação da ferramenta e a velocidade de avanço da ferramenta de SFL. Esta relação classifica a soldadura SFL em Fria, Quente e intermédia, contudo é difícil atribuir valores para a razão sem um estudo metalográfico “ex a dureza do cordão” para complementar a classificação da SFL.

3.3 - Aplicabilidade e vantagens da SFL

A soldadura SFL é uma tecnologia recente e começa apresentar agora várias áreas de aplicação, uma das suas aplicações é a soldadura de juntas, que podem formar diversas formas geométricas, das quais podem resultar da junção de materiais na forma de perfis extrudidos. Partindo do pressuposto que o objectivo é forma juntas soldadas de materiais na forma de perfis, podem-se construir estruturas ou máquinas. A Figura 56 apresenta formas típicas usadas nas juntas de soldadura de SFL.

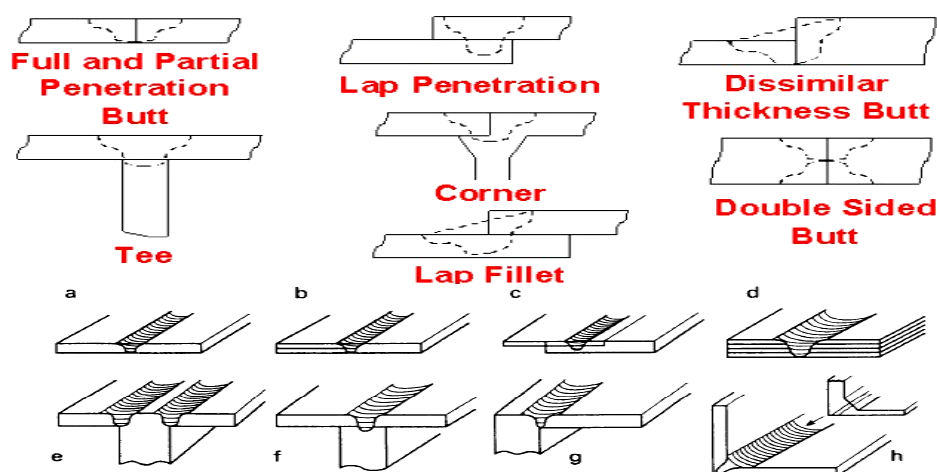


Fig.56 Juntas de Soldadura ou tipologias típicas para SFL.

O tipo de tipologia de juntas da Figura 56 entre outras possíveis, permitem usar esta nova tecnologia recente em áreas como indústria naval, indústria da aviação, indústria ferroviária, indústria automóvel (ligeiros e pesados), e indústria aeroespacial. Outras indústrias têm vindo a revelar-se de elevada aplicabilidade, como a carcaça de motores eléctricos, indústria petrolífera para ligação de tubagens e outros elementos estruturais, a indústria alimentar tem recorrido à ligação de formas e outros artigos utilizados na alimentação humana. A indústria da construção civil começa a apresentar soluções a exigirem a SFL como tabuleiros de pontes, plataformas, placas e paredes, resguardos, protecções e estruturas. A indústria de manutenção começa a recorrer a esta tecnologia, estão em estudo e desenvolvimento técnicas de reparação de fissuras resultantes ou de fadiga originadas pelos ciclos de carga ou por soldaduras ineficientes de outros métodos que não SFL. [64-65]

A Figura 57 demonstra a importância da Figura 56, na construção dos comboios, a Hitachi constrói comboios em perfis extrudidos de alumínio para o chão, algumas estruturas laterais e tecto da caixa do comboio, soldados por SFL.

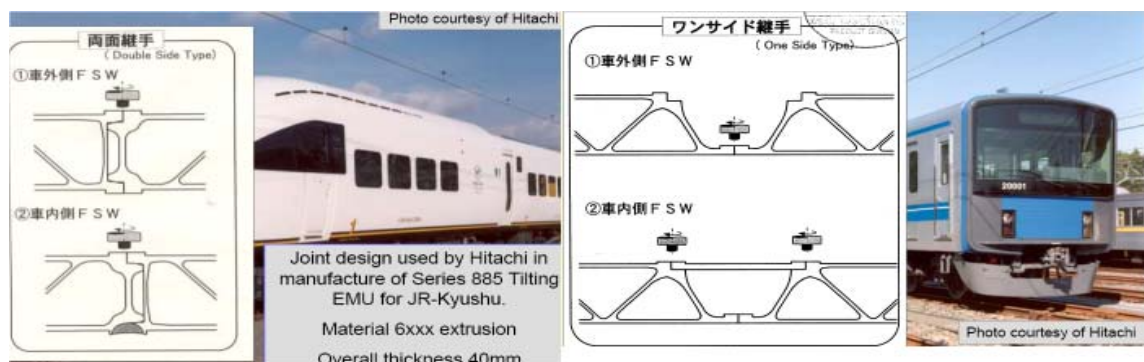


Fig. 57 A Hitachi recorrendo a SFL de perfis extrudidos constrói a caixa (carruagem) do comboio.

Da mesma forma se passa para a construção naval, no fabrico de navios, que recorrendo aos perfis, consegue fabricar algumas partes estruturais do navio importantes, que podem ser soldadas por SFL, como apresenta a Figura 58

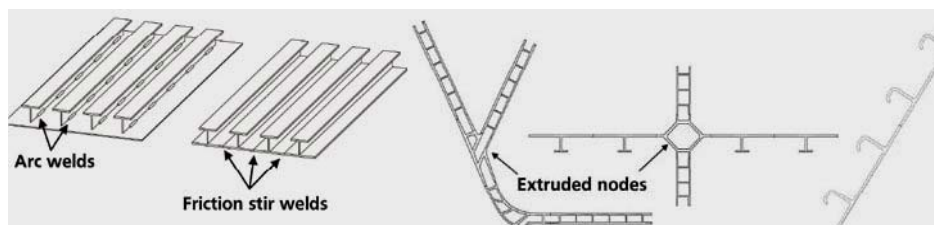


Fig. 58 Perfis usados em Navios soldados por SFL. [66]

Ainda para a indústria aeronáutica, partes importantes da fuselagem e chão entre outros elementos estruturais recorre à SFL, a Figura 59, apresenta parte da cabina do Eclipse 500 Business JET, soldada por SFL.



Fig. 59 Cabina do Eclipse 500 soldada por SFL.

A NASA aplicou nos tanques auxiliares do Space Shuttle a tecnologia SFL, e também em foguetões (BOEING Delta II) concretamente o tanque dos combustíveis líquidos. Tudo se resume ao método de como a junta de soldadura deverá ser. As tipologias usuais são as das Figura 56, a vantagem da SFL relativamente às juntas é que estas não necessitam dos

chanfros como nas convencionais usadas nas soldaduras de arco eléctrico e brazagem. O desenvolvimento desta tecnologia depende muito dos materiais, e junta de soldadura mas também o constrangimento da junta, ou seja, o modo de fixação dos elementos a soldar. É por essa razão que o desenvolvimento da SFL depende dos produtos a desenvolver, e os materiais sejam estes similares ou dissimilares que compõe o produto. A SFL de materiais dissimilares é aplicada entre materiais diferentes e/ou com espessuras diferentes, um exemplo de SFL dissimilar é apresentada nada Figura 56. No seguimento do tipo de junta a Figura 60 apresenta a carcaça de um motor eléctrico soldada e um tubo com uma gola ambos produtos soldados por SFL.



Fig. 60 Carcaça de Motor Eléctrico, e Tubo com uma Gola soldados por SFL.

A indústria automóvel começa a apresentar soluções para o uso da SFL a Figura 61 apresenta outra aplicação, o suporte de trás de um banco para uma viatura baseada novamente na soldadura de perfis de acordo com tipologias possíveis para SFL

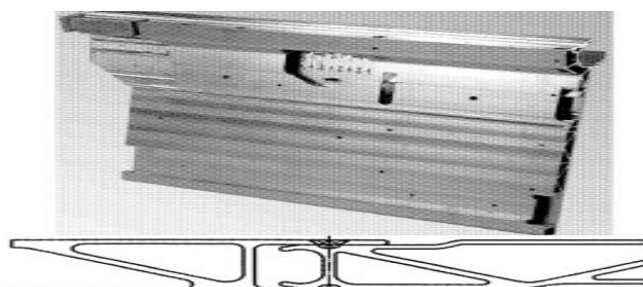


Fig. 61 Suporta de um banco de uma viatura. [67]

Contudo como consequência tem surgido variantes da SFL, nomeadamente uma usada no MAZDA RX-8 designada FSSW ou Friction Stir Spot Welding que apenas faz-se referencia neste relatório da sua existência por ser uma variante à FSW - Frition Stir Welding (SFL), que poderá ser uma séria concorrente à soldadura por pontos de resistência eléctrica, que se revelou até à data presente economicamente viável em detrimento à soldadura por pontos convencional. A Figura 62 apresenta simplificadaamente o processo, que usa na íntegra a tecnologia SFL e que se resume apenas a uma penetração e remoção conseguindo o efeito de soldadura sem a translação da Ferramenta. [68]

Spot friction welding (SFW)

RX-8 rear door (aluminum) made by SFW

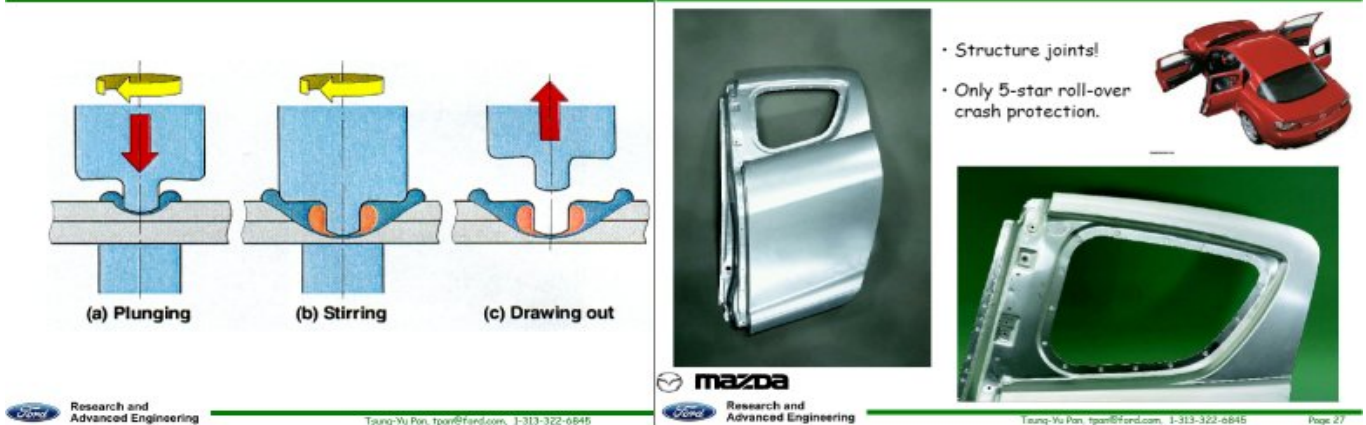
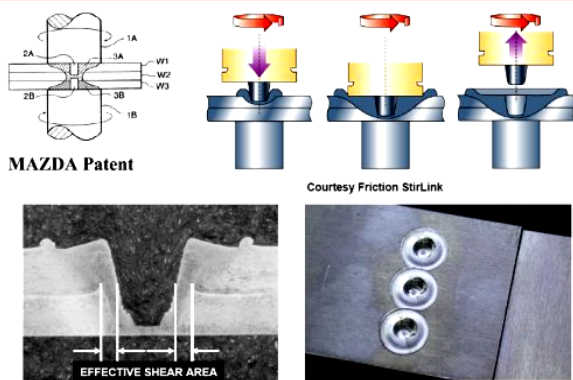


Fig.62 Soldadura de Fricção por Pontos Spot Friction Welding, variante da SFW-Stir Friction Welding (SFL). [68]

Na referência de variantes existe ainda outra variante da FSW (SFL) que é a Immersed Friction Stir Welded (IFSW) em desenvolvimento, a Submerged / Immersed FSW (SFSW / IFSW) soldadura de fricção linear da Junta submersa num fluido, introduz benefícios metalúrgicos no cordão de soldadura como uma dureza maior entre outros parâmetros mas omitida neste trabalho, apenas fica a sua referência como informação de promoção à SFL.

NOTA: A Mazda e a Riftec têm patentes registadas para a tecnologia de soldadura de fricção por pontos, na Figura 63 é exemplificada a abordagem da soldadura por pontos por SFL. Esta tecnologia é economicamente muito viável e vantajosa em energia e tempo, quando comparada com soldadura por pontos de resistência eléctrica.

Friction Stir Spot Welding (FSSW) is Likewise a Metalworking Process MAZDA Approach



Friction Stir Spot Welding (FSSW) is Likewise a Metalworking Process RIFTEC Approach

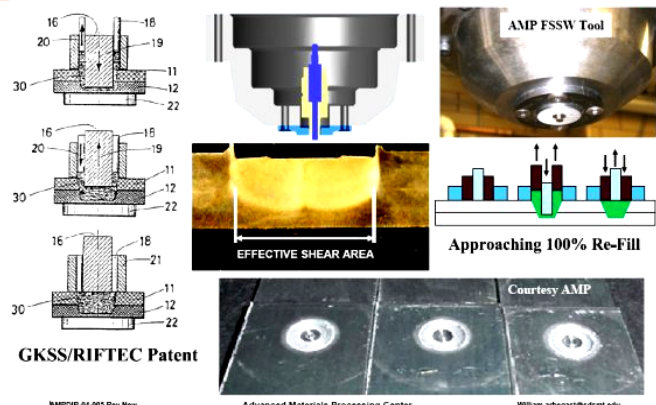


Fig.63 Processo de SFL por pontos segundo a MAZDA, e RIFTEC.

As Vantagens do processo SFL são:

- Materiais diversos: Solda uma gama extensiva de ligas, incluindo materiais difíceis de soldar por processos convencionais (e possivelmente materiais compósitos).
- Juntas duráveis: A resistência à fadiga das juntas soldadas por SFL é sensivelmente o dobro das efectuadas por fusão e é isenta de porosidade apreciável comparativamente à resultante da fusão.
- Soldaduras versáteis: Solda em todas as posições e cria juntas de soldadura direitas ou de formas complexas.
- Propriedades: Minimiza a distorção do material base.
- Operação segura: É isenta de perigos como fumos resultantes da solda, radiação, voltagem alta, metais líquidos, ou formação de arco eléctrico.
- Baixa distorção ou nenhuma do cordão, até mesmo em soldas longas.
- Propriedades mecânicas excelentes do cordão.
- Baixo nível de retracção (encolhimento) do cordão.
- Alguma tolerância a uma preparação prévia imperfeita da soldadura (finas camadas de óxidos).
- Ferramenta não consumível.
- Solda materiais convencionais, forjados, extrudidos e materiais de fundição.
- Sem salpicos.
- Sem material de adição (autogénea).
- Nenhuma certificação de soldador requerida.
- Energeticamente eficiente.
- Processamentos pós solda não requeridos.
- Sem porosidade ou isenta de porosidade apreciável.
- Capaz de soldar materiais dissimilares em espessura ou composição.

As Desvantagens do processo SFL podem ser resumidas a:

- Sistema especial de fixação dos componentes que formam a junta.
- Preferencialmente para geometrias simples (por ex. junta topo-topo ver Fig. 56).
- Licença de uso requerida de TWI (The Welding Institute).
- No presente momento existem ainda poucas aplicações, e grandes dificuldades resultantes dos constrangimentos exigidos das tipologias das juntas usais da SFL (Fig. 56)
- O cordão resultante da junta necessita de protecção contra a corrosão.

A Figura 64 termina a SFL apresentando uma cronologia de projectos com destaque para SFL a nível mundial.

Year	Application	Company
1995	*Hollow heat exchangers	Marine Aluminum, Norway
1996	*Commercial shipbuilding	Marine Aluminum, Norway
1998	Delta II rockets	Boeing, US
1999	*Commercial shipbuilding	SAPA, Sweden
2000	*Automotive components	SAPA, Sweden
2000	Laser system housings	General Tool, US
2001	*Motor housings	Hydro Aluminum (formerly Marine Aluminum), Norway
2001	*Automotive components	Showa, Japan
2001	*Train bodies	Hitachi, Japan
2002	*Automotive components	Tower Automotive, US
2003	Aircraft structure	Eclipse, US
2003	*Commercial shipbuilding	Advanced Joining Technologies, US
2004	Space shuttle external tanks	Lockheed Martin, US
2004	Food trays	RIFTEC, Germany

Fig. 64 Cronologia mundial de produtos que usam SFL. [66]

3.4 - Ligas de Alumínio e suas designações

O Alumínio e suas ligas apresentam-se numa elevada variedade, e como resultado foi necessário criar um sistema capaz de identificar as ligas como também as suas características em particular as mecânicas. Desta necessidade surgiram alguns sistemas de codificação como o UNS (Unified Numbering System) para ligas não ferrosas. Este sistema respeita as especificações impostas por ASTM E527 2 SAE J1086. A organização AA (Aluminum Association), contudo desenvolveu outro sistema independente e provavelmente mais difundido. Este sistema descreve o Alumínio e suas ligas, não só nos elementos de liga que atribui determinadas características mecânicas às ligas, como também os tratamentos térmicos e mecânicos que influenciam a sua dureza.

As ligas podem ser consideradas como soluções no estado sólido de um ou mais elementos dissolvidos na base (solvente) de um metal puro neste caso o Alumínio. Estas soluções sólidas, são adicionalmente endurecidas, por duas vias

- 1 – Enformação Mecânica sem tratamento térmico
- 2 – Tratamento Térmico podendo incluir Enformação Mecânica

As ligas metálicas podem ser consideradas uma solução no estado sólido [69], onde independentemente do elemento de liga os tratamentos aplicados alteram o seu estado energético interno [69] (tensão interna acumulada). Estes tratamentos aplicados às ligas metálicas podem ser térmicos ou mecânicos, conseguem assim alterar o estado de Dureza. [70]

Encruamento – É a modificação do estado estrutural dum metal ou de uma liga resultando dum trabalho ou deformação plástica à temperatura ambiente (por vezes morno).

É definido por uma taxa de encruamento que mede a redução da secção do perfil de acordo com a expressão: $[(S_i - S_f)/S_i] \times 100$. [70]

Solubilização – Primeiro passo do procedimento de endurecimento é o aquecimento de uma liga a uma temperatura elevada, de forma a dissolver os elementos de liga em solução (a matriz metálica neste caso para a AA é "Alumínio"). Segundo passo, é a tempera, de forma a produzir uma solução sobre - saturada à temperatura ambiente. Este processo é seguido de envelhecimento.

Envelhecimento – É a formação de precipitados finamente dispersos na liga. Estes precipitados impedem o movimento das deslocções (defeitos cristalinos) durante a deformação, forçando as deslocções a cortar ou rodear as partículas. O envelhecimento das ligas à temperatura ambiente chama-se envelhecimento natural, o envelhecimento a temperaturas elevadas é designado por envelhecimento artificial. A temperatura de envelhecimento artificial é, 15 a 25% da diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de solubilização, acima da temperatura ambiente.

Sobre - envelhecimento – É a precipitação exagerada ou crescimento exagerado dos elementos e compostos a partir da solução sobre - saturada. Ocorre uma redução de resistência mecânica e resistência à corrosão, por vezes resulta numa melhoria da resistência à corrosão ou outras propriedades.

Estabilização – Aquecimento de uma liga, para acelerar a sua tendência natural para amaciar por envelhecimento, e assim trazer a liga para o seu estado final de resistência e ductilidade.

Recozimento/Recristalização – Processo de amaciamento para metais trabalhados a frio que foram aquecidos a $0,3T_F$ metais puros, e $0,5T_F$ metais impuros e ligas que encruaram. Este processo tem por objectivo anular ou aliviar o efeito de encruamento tornando o metal menos duro e mais macio, o processo mantém um determinado tempo a uma determinada temperatura o metal para conseguir uma recristalização capaz de amaciar o metal.

[63], [69-70]

O sistema de identificação criado pela AA, obriga a identificação da liga da seguinte forma: **XXXX-YYY**, ou seja deverá ter 4 dígitos (XXXX) posteriormente um hífen e normalmente seguidos de 3 dígitos (YYY). Os dígitos (XXXX) definem o elemento de liga principal do Alumínio, os (YYY) identificam o tratamento de endurecimento que a liga tem. Para o caso do elemento de liga existem duas situações, ligas resultantes de enformação (laminagem/extrusão) que são designadas por (XXXX), e as ligas de fundição que são designadas por (XXX.X).

No caso de ligas de extrusão o 1º dígito (**Xxxx**) indica o elemento de liga principal que foi adicionado à liga de alumínio e é usualmente descrito por séries de liga de alumínio, i.e., séries 1000, 2000, 3000, até 8000, ver tabela 1, o 2º dígito (**xXxx**), se é diferente de 0 indica modificações feitas à liga, e o 3º e 4º dígitos (**xxXX**) são números arbitrários dados

para identificar uma liga específica nas séries. Exemplo: Na liga 5183, o número 5 indica que é das séries de elemento de liga magnésio, o número 1 indica que houve uma 1ª modificação à liga 5083 que era a original, e os dígitos 83 identificam a liga dentro da série 5xxx. A única exceção para este sistema de numeração de ligas de alumínio está na série 1xxx (alumínio puro) na qual, os últimos 2 dígitos indicam a percentagem de alumínio mínima acima de 99%, i.e., A "Liga" 1350 tem no mínimo 99.50% alumínio na sua composição.

No caso de ligas de fundição a designação do sistema de ligas de fundição é baseada em apenas 3 dígitos e uma posição decimal xxx.x (i.e. 356.0). O 1º dígito (Xxx.x) indica o elemento de liga principal que foi adicionado à liga de Alumínio, o 2º e 3º dígitos (xXX.x) são números arbitrários dados para identificar uma liga específica nas séries. O número seguinte ao ponto decimal indica se a liga é de fundição (.0) ou um lingote (.1 ou .2). Um prefixo de letra (A xxx.x) maiúscula indica uma modificação a uma liga específica. Exemplo: Liga - A356.0 a letra maiúscula A (Axxx.x) indica uma modificação da liga 356.0. O número 3 (A3xx.x) indica que é das séries do silício mais cobre e/ou magnésio. O número 56 (Ax56.0) identifica a liga dentro das séries 3xx.x, e o .0 (Axxx.0) indica que é uma fundição com forma final definitiva e não um lingote.

Tab. 1 Designação das Ligas de Alumínio e Ligas de Fundição

Ligas Alumínio de Extrusão		Ligas Alumínio de Fundição	
Liga Séries	Elemento de Liga Principal	Liga Séries	Elemento de Liga Principal
1xxx	99.000% Mínimo de Alumínio	1xx.x	99.000% Mínimo de Alumínio
2xxx	Cobre	2xx.x	Cobre
3xxx	Manganês	3xx.x	Silício e Cobre e/ou Magnésio
4xxx	Silício	4xx.x	Silício
5xxx	Magnésio	5xx.x	Magnésio
6xxx	Magnésio e silício	6xx.x	Séries não usadas
7xxx	Zinco	7xx.x	Zinco
8xxx	Outros Elementos (Lítio Magnésio, ...)	8xx.x	Estanho
9xx.x	Séries não usadas	9xx.x	Outros Elementos

Existem dois grupos nas ligas de Alumínio, as termicamente modificáveis (são as ligas que podem ganhar resistência pela adição de calor) e as ligas de Alumínio termicamente não processáveis. Esta distinção é particularmente importante ao considerar o afeito do arco eléctrico para a solda nestes dois tipos de materiais. As séries 1xxx, 3xxx, e 5xxx são termicamente não processáveis e só são possíveis de endurecer por imposição de tensão interna na liga. As séries 2xxx, 6xxx, e 7xxx são termicamente processáveis e as séries 4xxx consistem em ambos casos as termicamente processáveis e não processáveis. As séries das ligas de fundição 2xx.x, 3xx.x, 4xx.x e 7xx.x são termicamente processáveis. Não é usual o endurecimento por Tensão interna induzida nas ligas de fundição.

As designações básicas de têmpera estão designadas na Tabela 2

Tab. 2 Designações de Tempera (endurecimento)

Letra	Significado
F	Como fabricado - Aplicado a produtos resultantes do processo de formação no qual nenhum controle especial de processamento térmico ou endurecimento é aplicado
O	Recozido - Aplicado a um produto que foi aquecido para reduzir há mais baixa condição de tensão interna de forma a melhorar a ductilidade e a estabilidade dimensional
H	Endurecimento por Deformação (Encruamento) - Aplicado a produtos que são endurecidos por trabalho mecânico a frio (promove tensão interna). O endurecimento pode ser seguido por um tratamento térmico adicional que reduz algum do estado de tensão interna. O "H" é sempre seguido por dois ou mais dígitos
W	Solubilização por tratamento Térmico - Uma tempera instável aplicável só para ligas que envelhecem espontaneamente a temperatura ambiente depois do tratamento térmico de Solubilização
T	Termicamente Tratado - Para se produzir tempera estáveis diferentes das F, O, ou H. Aplicado a um produto que foi tratado termicamente, por vezes gerando um endurecimento adicional, para produzir uma têmpera estável. O "T" é sempre seguido por um ou mais dígitos

Alem da designação de têmpera básica, existem duas categorias de subdivisão, uma representada por "H" Tempera - Endurecimento por Tensão interna, e a outra designada por "T" Tempera - Termicamente tratada.

Subdivisões de Tempera H - Endurecimento por Deformação (Encruamento)

O primeiro dígito depois do H indique uma operação básica:

- H1 – Endurecimento por Deformação (End. por Def.) unicamente (Encruamento).
- H2 – End. por Def. e Parcialmente Recozido (Encruamento e parcialmente Recozido).
- H3 – End. por Def. e Estabilização (Encruamento e Estabilização).
- H4 – End. por Def. e Envernizado ou Pintado (Encruamento e Envernizado ou Pintado).

O segundo dígito depois do H indica o grau de endurecimento induzido pela tensão interna:

- HX2 – $\frac{1}{4}$ de Dureza HX4 – $\frac{1}{2}$ de Dureza HX6 – $\frac{3}{4}$ de Dureza
- HX8 – Totalmente Duro HX9 – Extra Duro

Subdivisões de Tempera T - Termicamente Tratada

- T1 - Naturalmente envelhecido depois de arrefecer de uma temperatura elevada resultante do processo de extrusão.
- T2 -Trabalhado a Frio (T. F.) depois de arrefecer de uma temperatura elevada resultante dum processo de moldagem e então naturalmente envelhecido.
- T3 -Tratamento Térmico (T. T.) de Solubilização, T. F. (Encruamento) e Envelhecido Naturalmente.
- T4 -T. T. de Solubilização e Envelhecido Naturalmente.
- T5 -Artificialmente Envelhecido depois de arrefecer de uma temperatura elevada resultante dum processo de moldagem.
- T6 -T. T. de Solubilização e artificialmente Envelhecido.
- T7 - T. T. de Solubilização e estabilizado (Sobre Envelhecido)
- T8 - T. T. de Solubilização, trabalhado a frio e artificialmente envelhecido.
- T9 - T. T. de Solubilização, artificialmente envelhecido e trabalhado a frio.
- T10 -T. F. depois de arrefecer de uma temperatura elevada dum processo de moldagem e artificialmente envelhecido. Dígitos adicionais indicam alívio de tensão.

Exemplos:

- TX51 or TXX51 – Alívio de Tensão por estiramento.
- TX52 or TXX52 – Alívio de Tensão por compressão.

Fontes [63], [69-75]

4. Experimentação

4.1 – Materiais

Os materiais utilizados foram produzidos por pulverotecnologia no INETI. Trata-se de espumas metálicas de Alumínio de poro fechado. As espumas foram fornecidas em barras com 209x35x15 mm, com a designa AA de AA6061.

Inicialmente fez-se uma caracterização mecânica das espumas, nomeadamente através da realização de ensaios de esmagamento.

Estes ensaios foram realizados na secção de Tecnologia Mecânica no IST. Uma parte dos ensaios foi efectuada na máquina de SFL, com 3 eixos de movimento X, Y e Z e velocidade de rotação da ferramenta. A Figura 65 demonstra o equipamento usado no IST.

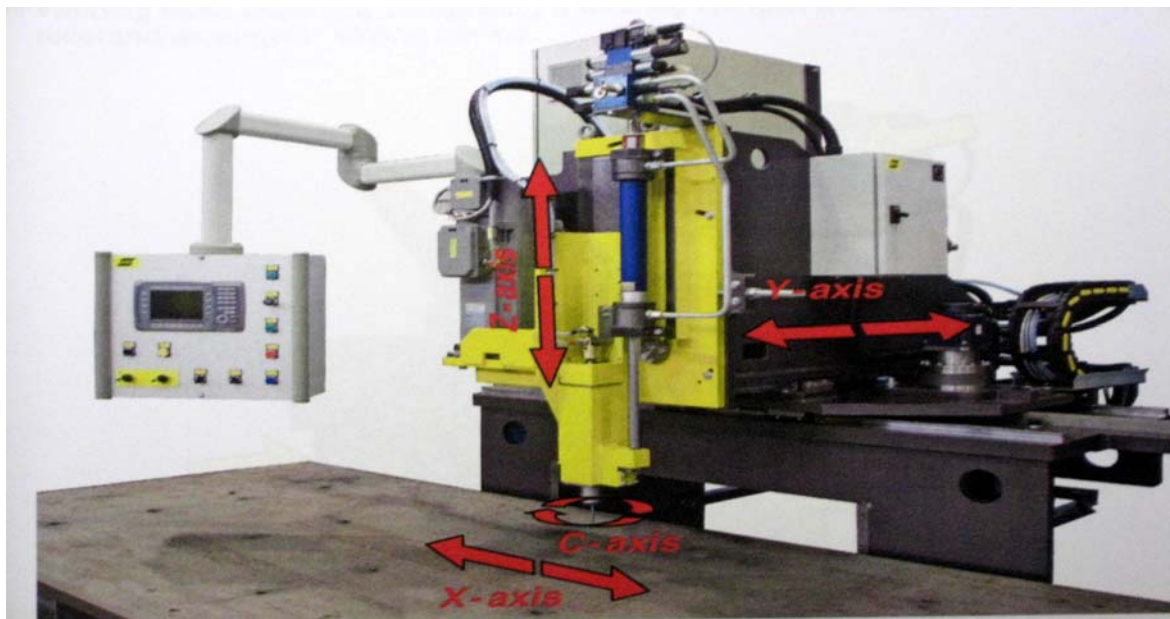


Fig 65 Máquina SFL ESAB (Legio) da secção de Tecnologia Mecânica do IST.

Pretendia-se avaliar o efeito de esmagamento com uma força de compressão. A Figura 66 apresenta o procedimento experimental. O suporte da ferramenta de SFL comprime uma espuma metálica entre duas chapas de aço considerado indeformável porque é mais duro que a espuma. Previamente, tinham sido rectificadas os provetes numa fresadora convencional na forma original de 35x35x15 mm para 30x30x8 mm. O rebaixamento de 15 para 8 mm foi efectuada com o objectivo de uniformizar as faces da espuma para que o efeito da pressão de esmagamento fosse uniforme sobre toda a superfície da espuma.

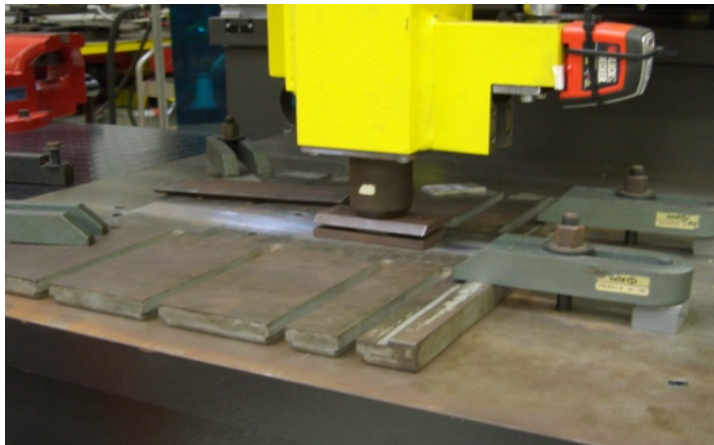


Fig. 66 Ensaio de esmagamento preliminar na Máquina de SFL da Secção de Tecnologia Mecânica do IST.

Critério usado para o esmagamento das Espumas Metálicas

O primeiro consistiu no controlo da força efectuado manualmente por patamares crescentes e a máquina registava temporalmente a força e penetração.

O segundo consistiu em programar na máquina o avanço controlado pelo CNC e registar as variáveis do processo que eram a força e o esmagamento (penetração). O avanço programado foi de 0.1mm/min.

Foram feitas medições de massa dos provetes antes e após a compressão, com objectivo de determinar a porosidade antes e após compressão, para avaliar o efeito da força, massa e porosidade dos provetes e compreender onde se situa, em termos numéricos, o valor da força para realizar a densificação da espuma. As Figuras 67 e 68 apresentam o resultado da compressão, nos ensaios preliminares das espumas.

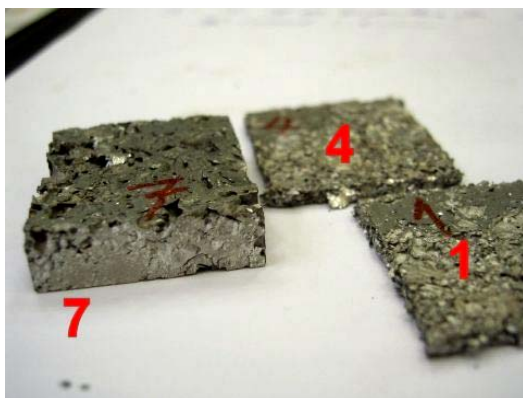


Fig.67 Comparação entre os provetes 7, 4 e 1, 1 e 4 foram esmagados no ensaio preliminar.



Fig.68 Comparação em perfil de provete esmagado e não esmagado no ensaio preliminar.

4.2 – Ensaio de SFL e MIG de provetes simples

Esta fase, envolveu vários procedimentos uma vez a caracterização efectuada em 4.1. Para isso, das barras originais de espumas metálicas no formato 209x35x15 mm foram cortados paralelepípedos de 35x35x15 mm, submetidos novamente a ensaios de compressão de maior valor que os efectuados na máquina de SFL, de modo a reduzir a porosidade. Contudo, a falta de controlo da carga originou uma espessura não constante nos provetes o que se traduziu numa clara dificuldade para a soldadura.

A Figura 69 mostra a forma dos provetes para soldadura. Na Figura 70 apresenta-se a prensa Hidráulica onde foram feitos os ensaios de esmagamento.



Fig.69 Provetes de soldadura.



Fig.70 Prensa Hidráulica de 40 T de força.

Os provetes após esmagamento foram cortados ao meio e seus topos rectificados para que formassem uma superfície plana.

Durante todos os ensaios de soldadura efectuados houve uma evolução difícil de concretizar quanto ao modo de fixação dos provetes. As Figuras 71 e 72 ilustram o sistema de posicionamento dos provetes na máquina de SFL que foi desenvolvido especificamente para esta aplicação.

A Figura 71 ilustra o procedimento de fixação dos provetes na máquina de SFL e a Figura 72 revela um ensaio.

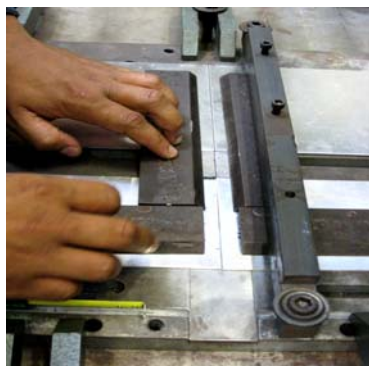


Fig 71 - Fixação dos provetes na máquina SFL.



Fig.72 Ensaio de soldadura.

Os ensaios foram realizados com a ferramenta ilustrada na Figura 73 e geometria indicada na Tabela 3. A Figura 74 apresenta a porta Pinos num detalhe maior. O pino usado era de Diâmetro M3 Trifacetado



Fig.73 Ferramenta SFL usada nos ensaios de soldadura.

Tab. 3 Ferramenta SFL usada nos ensaios de soldadura.

Pin Diamater	M3 (mm)
Sholder Diamater	14 (mm)
Pin Length	1,8 (mm)



Fig. 74 Sholder e pino da ferramenta SFL usada nos ensaios.

Os ensaios de soldadura foram efectuados topo-topo em provetes de espuma prensada. Os parâmetros ensaiados estão descritos na Tabela 4

Tab. 4 Parâmetros de ensaios de SFL.

Ensaio	α (x°)	Ω (RPM)	V_a (mm/min)	P_p (mm)
Pr1F1	2	800	300	0,15
Pr2F1	2	800	160	0,15
Pr3F1	2	800	200	0,15
Pr4F1	2	800	200	0,15
Pr5F1	2	800	200	0,15
Pr6F1	2	800	400	0,15
Pr7F1	2	800	500	0,15
Pr8F1	2	800	600	0,15
Pr9F1	2	800	700	0,15

Em que:

α - Ângulo de ataque, Ω - Velocidade de Rotação, V_a - Velocidade de avanço

P_p – Posição do Pino (Pin Position)

PrxF1 – Prx = Provede x (x=1,2,3,4,5,6,7,8,9); F1 = Ferramenta 1

Todos os ensaios efectuados nesta fase usaram o método de controlo de posição do Pino.

Os ensaios de soldadura por MIG foram efectuados na Secção de Tecnologia Industrial da FCTUNL numa máquina KEMPI usando um material de adição AlMg5 segundo a AWS A5.10 com 1 mm de diâmetro.

4.3 – Realização de Macrografias e Micrografias dos provetes

As soldaduras foram inspeccionadas visualmente e em microscopia óptica no Laboratório de Tecnologia Industrial da FCTUNL.

Após a escolha do Provette que apresentava por inspecção visual a melhor junta de soldadura, foi feito um corte transversal do cordão, numa Máquina de corte ATA Brillant 221 com um disco diamantado de 120 mm de diâmetro com uma rotação de 2400 RPM com um avanço à taxa de 1 mm/min (Fig. 75). As amostras assim obtidas foram montadas em resina a frio para preparação metalográfica como é apresentado na Figura 76.



Fig. 75 Máquina de corte de amostras ATA Brillant 221.



Fig. 76 Montagem de Provete em Resina.

Noutra fase do procedimento de preparação da amostra, consistiu em desbastar numa lixadeira rotativa a 600 RPM com lixas de 600, 1200 e 2500 e polir com uma suspensão de polimento líquida denominada OPS (Oxid Polier Susspension) com um efeito de coloração simples da amostra. Durante todo o processo de polimento usou-se água como refrigerante. Na última fase de polimento a face passou num disco de feltro para acabamento final da face. A máquina usada está representada na Figura 77



Fig.77 Máquina de polimento de amostras.

Passada a fase de preparação da amostra foram efectuadas as Micrografias num Microscópio Óptico equipado com uma câmara fotográfica digital, representado na Figura 78



Fig. 78 Microscópio Óptico da secção Laboratorial da secção mecânica do DEMI.

4.4 - Ensaios de Dureza

A dureza foi determinada nos Laboratórios do IST num Microdurómetro da marca Struers modelo Duramin. Este equipamento baseia-se no método Vickers para determinação da dureza. A Figura 79 apresenta o Microdurómetro utilizado.



Fig. 79 Microdurómetro Struers Duramin.

O método usado é a dureza Vickers, a objectiva usada neste equipamento é de 40X para visualização e medição das diagonais da indentação do ensaio. O ensaio de dureza usado tinha os seguintes parâmetros:

A Carga de indentação = 0,5 Kgf

Tempo de indentação = 15 s

5. Resultados e Discussão

5.1 - Resultados dos ensaios de Esmagamento das Espumas Preliminares 1º lote de espumas

A tabela 5 apresenta os resultados da variação de massa das espumas após esmagamento efectuados num lote preliminar de material fornecido.

Tab 5 Massa dos provetes antes e após ensaios de esmagamento.

Provete	Fase 1	Fase 2	Dif. Massa	Dif. %
	Massa (gr)	Massa (gr)		
1	2,183	2,149	0,034	1,56
2	2,206	2,183	0,023	1,04
3	3,527	3,509	0,018	0,51

Fase 1 - Anterior ao esmagamento

Fase 2 - Posterior ao esmagamento

Dif. Massa - Diferença de Massa

Dif. % - Diferença percentual

A Tabela 6 apresenta as dimensões dos provetes preparados para caracterização do comportamento ao esmagamento. Os lados A, B e C representam especificamente:

A - Largura, B - Comprimento e C - Espessura dos provetes em mm

Tab. 6 Dimensões dos Provetes 1º lote.

Fase 1			
Provete	Lado A (mm)	Lado B (mm)	Lado C (mm)
1	28,5051	29,75	8,2563
2	28,3022	29,7691	8,0362
3	29,8127	29,012	8,0727
Fase 2			
Provete	Lado A (mm)	Lado B (mm)	Lado C (mm)
1	28,5051	29,75	4,9875
2	28,3022	29,7691	4,03125
3	29,8127	29,012	4,35

A Tabela 7 apresenta os resultados da densidade relativa dos provetes preliminares 1º lote nos ensaios de esmagamento.

Tab. 7 Densidade Relativa durante os ensaios de esmagamento.

Provetes	Fase 1	Fase 2	Variações da Densidade Relativa	
	Densi. Rel	Densi. Rel	Δ	$\Delta \%$
1	0,1155	0,2871	0,1716	148,57
2	0,1207	0,2396	0,1189	98,51
3	0,1871	0,4036	0,2165	115,71

Em que:

Δ - Variação da Densidade Relativa

$\Delta \%$ - Variação percentual da Densidade Relativa

Densi. Rel. – Densidade Relativa

A máquina de SFL durante os ensaios de esmagamento permitiu recolher dados que com tratamento de pós compilação, permitiram traçar o gráfico apresentado na Figura 80.

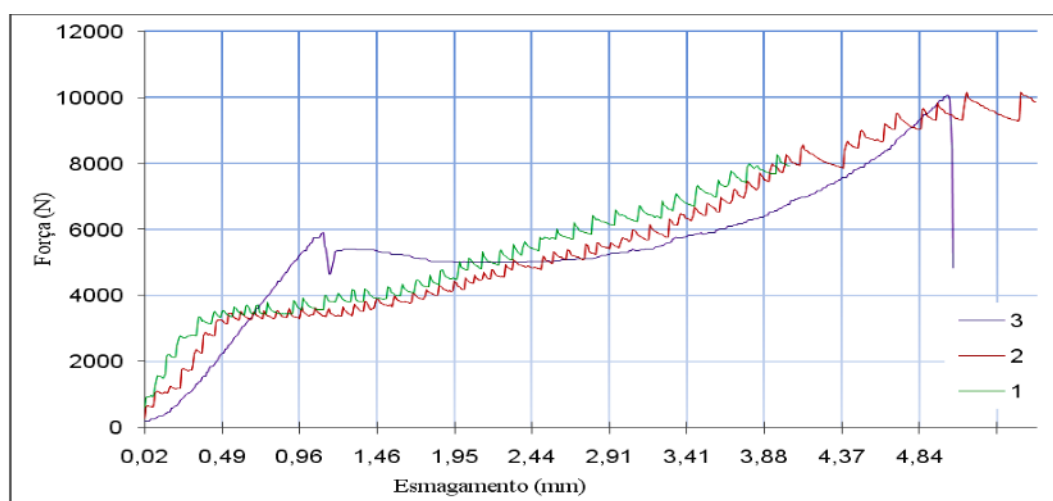


Fig. 80 Ensaios de esmagamento dos Provetes preliminares 1, 2 e 3 (1º lote de espumas).

Analisando os dados recolhidos pelas tabelas 5 e 7, o efeito compressivo sobre as espumas não causa variações de massa que possam comprometer o fluxo de material “visco plástico” do processo SFL (Tab. 5). O esmagamento causou uma variação apreciável da densidade relativa como era esperado (Tabela 7). O gráfico da Figura 80 apresenta os dois ensaios distintos: um incremental (provetes 1 e 2) controlado manualmente, e outro controlado pelo controlador (proвете 3). Este ensaio parou nos 10KN (1000Kgf) por ser o limite de força possível de exercer em segurança sem danos estruturais na máquina de SFL. Verificou-se que a densificação dos provetes inicia-se por volta dos 6000N (600Kgf) e um esmagamento na ordem de 3,41mm no provete 3. Nesse ponto é visível um incremento exponencial da força evidenciando a transição do patamar de amortecimento para a densificação, apesar dos provetes 1 e 2 aparentarem ter a transição nos 4000N (400Kgf) com um esmagamento de 1,95 mm, estes dados indicam que o ponto de transição entre o patamar de amortecimento e início de densificação, se situe aqui.

5.2 - Resultados dos ensaios de Soldadura dos provetes simples 2º lote de espumas

Este conjunto de ensaios corresponde a um 2º lote de espumas metálicas. Assim, é possível que existam ligeiras variações em termos de comportamento das espumas.

A Tabela 8 apresenta a caracterização dos provetes antes de serem processados por SFL. Os lados A, B e C representam especificamente:

A - Largura, B - Comprimento e C - Espessura dos provetes em mm

Tab. 8 Caracterização dos Provetes de Espuma Esmagados antes da SFL.

Proвете	Dimensões (mm)			Vol. (cm ³)	Massa	Densi. Rel	Índ. Poros.
	Lado A	Lado B	Lado C	Vol	Gr	""	""
Pr1	35	35	2,45	3	5,674	0,7	0,3
Pr2	34	36	2,3	2,82	4,633	0,608	0,392
Pr3	37	35	2,4	3,11	7,215	0,859	0,141
Pr5	38	36	2	2,74	5,677	0,767	0,233
Pr6	35	36	2,35	2,96	6,947	0,869	0,131
Pr7	33	35	2,55	2,95	5,484	0,689	0,311
Pr8	39	37	2,12	3,06	6,396	0,774	0,226
Pr9	39	40	2,5	3,9	9,371	0,89	0,11
Média	36,25	36,25	2,33	3,07	6,42	0,77	0,23

Em que:

Vol.- Volume calculado do provete

Densi. Rel. – Densidade Relativa " ρ/ρ_s "

Índ. Poros. – Índice de Porosidade " $1 - (\rho/\rho_s)$ "

Na Tabela 9 são apresentados parâmetros operatórios usados nos ensaios de soldadura.

Tab. 9 Resultados Finais do ensaio SFL.

Ensaio	α	Ω	Va	Pp	Ls	Ω / Va
Pr1F1	2	800	300	0,15	24,24	2,67
Pr2F1	2	800	160	0,15		5
Pr3F1	2	800	200	0,15	23,3	4
Pr4F1	2	800	200	0,15		4
Pr5F1	2	800	200	0,15	21,5	4
Pr6F1	2	800	400	0,15	22	2
Pr7F1	2	800	500	0,15	19,5	1,6
Pr8F1	2	800	600	0,15	19,7	1,33
Pr9F1	2	800	700	0,15	23	1,14

Em que:

L_s – Comprimento do cordão de soldadura SFL

P_p – Posição do Pino (Pin Position)

De todos os provetes ensaiados apenas alguns se conseguiu gerar um fluxo de material que conduziu a união das amostras. Os restantes provetes em particular o Prf1F1 ficou unido mas por um cordão muito frágil, e na manipulação manual a ligação estabelecida por SFL quebrou por ser tão frágil.

Nas figuras 81 e 82 apresentam-se macrografias da face e da raiz do cordão dos provetes obtidos mais significativos.



Fig. 81 Macrografia da face de topo (revela passagem do shoulder) e raiz do Provede Pr6F1.

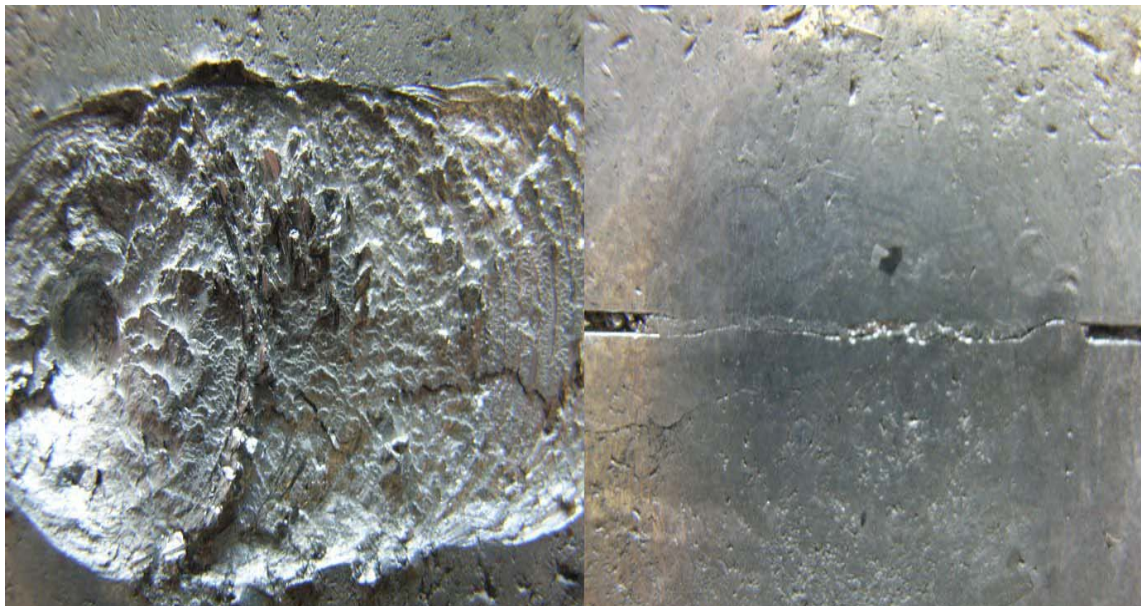


Fig. 82 Macrografia da face de topo (revela passagem do shoulder) e raiz do Provede Pr8F1.

Em todas é visível falta de penetração na raiz e fissuração longitudinal no cordão.

Efectivamente, a heterogeneidade do material origina um cordão não contínuo, em que é evidente a falta de mistura uniforme dos dois provetes. A dimensão insuficiente dos provetes impediu a estabilização do processo durante a soldadura assistindo-se a um frequente destacamento de partículas de dimensão variável. Por outro lado, não existe um conhecimento profundo da orientação dos poros nas espumas processadas que como se viu anteriormente (a espuma usada aqui é do tipo AA6061), a orientação dos poros afecta as propriedades mecânicas direccionais do material, pouco mais é definido pela designação da AA.

Observando com maior ampliação em microscopia óptica as ligações produzidas por SFL é evidente o fluxo de material na zona do nugget interrompido frequentemente pela existência de poros pré existentes. Nas figuras 83 e 84 ilustra-se a micro estrutura observada em diversos pontos do cordão. De notar que frequentemente existem fissuras que se desenvolvem a partir de poros devido a esforço mecânico imposto pela fricção linear.



Fig. 83 Micrografia (ampliação 50x) do provete, extremo direito do cordão de SFL.



Fig. 84 Micrografia (ampliação 50x) provete, intermédio direito do cordão de SFL.

As Figuras 85 e 86 são a continuação da sequência das figuras anteriores 83 e 84



Fig. 85 Micrografia (ampliação 50x) do provete intermédio esquerdo do cordão de SFL.

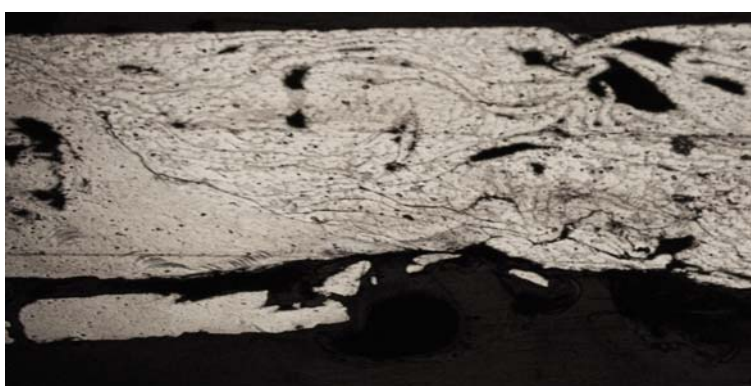


Fig. 86 Micrografia (ampliação 50x) do provete extremo esquerdo do cordão de SFL.

As Figuras 88 e 89 são ampliações do cordão de SFL e são a continuação da sequência anterior 84 e 85, a Figura 87 é o enquadramento do cordão de SFL com ajuste luminoso superior a seta rosa serve de indicador para um ponto de referência

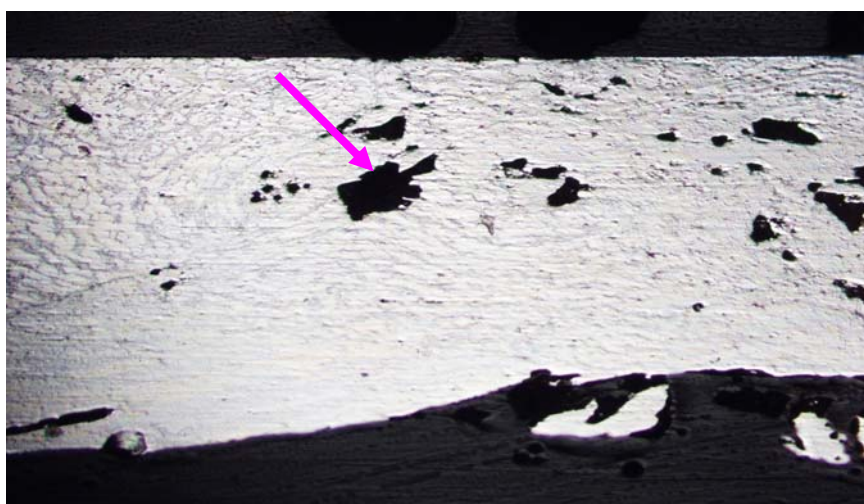


Fig. 87 Micrografia (ampliação 50x) na zona central do cordão.



Fig. 88 Micrografia, (ampliação 100x) zona intermédia esquerda do cordão, a seta rosa serve de ponto de referência num poro.

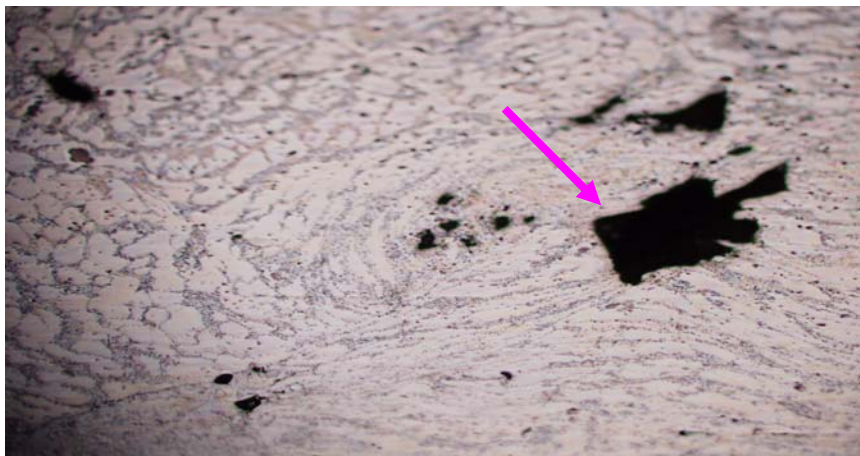


Fig. 89 Micrografia (ampliação 100x) na zona intermédia direita do cordão, seta rosa serve de ponto de referência num poro.

Efectuando uma análise visual dos provetes soldados é visível que houve Fluxo de material, em particular no provete Pr6F1 e que o grau de constrangimento dos provetes durante a soldadura é fundamental. Uma vez que a dimensão das amostras era muito reduzida por falta de material observaram-se por vezes deslizamentos dos provetes que inviabilizaram a soldadura.

É importante verificar que apesar de as espumas terem sido prensadas, existia ainda uma elevada porosidade, que contudo permitiu efectuar a movimentação de matéria de forma a garantir uma mistura do tipo extrusão de dois materiais.

Dos ensaios efectuados, verificou-se que para as espumas esmagadas nas condições experimentais usadas, os parâmetros de soldadura que forneceram ligações de melhor qualidade foram os seguintes:

$$\alpha = 2^\circ$$

$$\Omega = 800 \text{ RPM}$$

$$V_a = \text{oscila entre 400 a 600 mm/min}$$

$$P_p = 0,15 \text{ mm}$$

α - Ângulo de ataque,

Ω - Velocidade de Rotação,

V_a - Velocidade de avanço

P_p – Posição do Pino “penetração” (Pin Position)

Nestes ensaios os parâmetros requeridos eram completamente desconhecidos. Assim, para determinar em primeiro ensaio os parâmetros para soldar na máquina de SFL as espumas esmagadas, usou-se o controlo de posição, isto é impôs-se a posição do pino numa penetração em que a extremidade do pino dista de 0,15 mm da face inferior do provete (Figura 53). Por esta razão a face superior por onde passou o shoulder (Figura 53) apresenta uma elevada deformação plástica dando um aspecto de material remexido e desprendido da face superior do provete. Este ensaio visava encontrar parâmetros, que são apresentados na Tabela 9; incluindo a força de forjamento vertical a aplicar na ferramenta de SFL. Contudo foi verificado que este valor oscila entre os 800 a 2000 N.

A Figura 90 apresenta a evolução da força vertical exercida na ferramenta no provete Pr6F1.

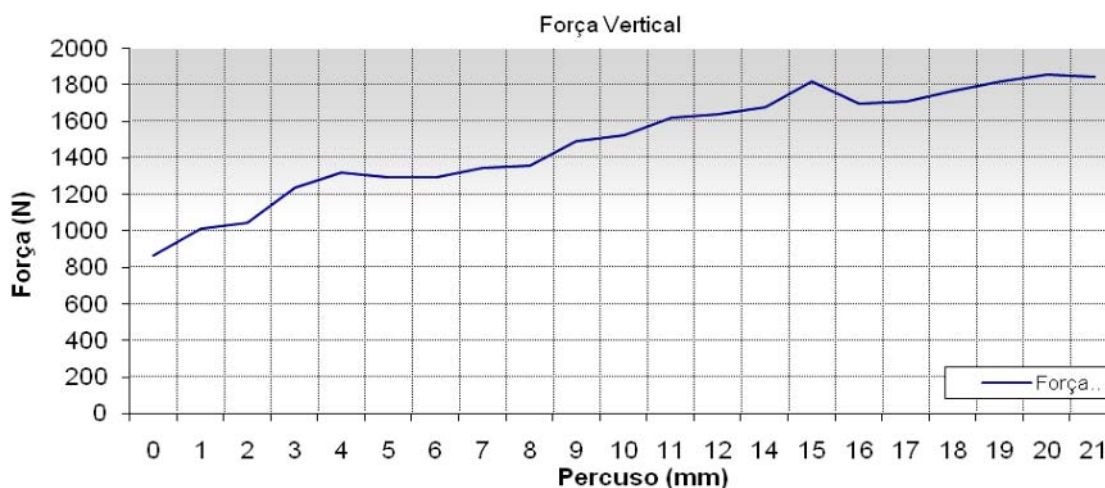


Fig. 90 - Evolução da força vertical no decorrer da formação do cordão de soldadura de Pr6F1.

A Figura 91 revela as partículas libertadas pela passagem da ferramenta de SFL, apesar deste fenómeno se verificar houve ligação e o Fluxo De material “visco plástico” foi verificado, este provete foi um dos que efectivamente ligou por SFL, trata-se do provete Pr8F1. A Figura 91 justifica de certa forma as ligeiras elevações verticais em forma de picos

na evolução da força vertical durante a passagem da ferramenta de SFL. Estas elevações repentinas da força podem ser explicadas pelas partículas libertadas que deslocam-se no interior do sholder produzindo vibrações e/ou a própria libertação/desprendimento destas partículas resultantes dos poros esmagadas em camadas que se soltam facilmente por falta de aderência entre estas camadas. Estas partículas poderão ser minoradas num processamento que não seja de controlo de posição, o controlo de posição foi usado para avaliação da força de forjamento vertical.



Fig 91 Provete Pr8F1 imediatamente após realização da passagem da Ferramenta SFL.

Dos resultados obtidos e tendo em particular atenção o provete Pr6F1 que por inspecção visual evidencia claramente a formação de um fluxo mais contínuo de material. Contudo os ensaios das espumas do 1º lote serviram para detectar o ponto de transição do patamar de amortecimento e densificação da espuma, permite verificar que a força de forjamento vertical exercida na espuma durante a soldadura se aproxima concretamente da densificação evidenciada nas espumas do 1º lote, a densificação situou-se numa força vertical no intervalo de 4000 a 6000 N, os resultados da força gerada no ensaio SFL do provete Pr6F1 oscilaram no intervalo 800 a 2000 N. Apesar de o segundo lote de espumas se apresentar mais uniforme e com espumas mais densas que as iniciais, os resultados experimentais indicam que a força vertical gerada durante o ensaio de soldadura de provetes simples espuma-espuma na tipologia de topo a topo apresentaram valores muito próximos do ponto de transição da densificação da espuma. Pode ser reconhecido que a maior densificação possível de atribuir à espuma é exigida não só para garantir um aumento de densidade fazendo com que a densidade relativa se aproxime da unidade, mas também porque beneficiará muito todo o processo de SFL; em termos da força de forjamento, esta revelou ser elevada como evidenciam os resultados apresentados.

A porosidade revelou que a falta de material compromete o fluxo de material “visco plástico”, e em comparação com o material denso poderá requerer maior velocidade de avanço para compensar a baixa densidade relativa. Também pela análise das micrografias 87, 88 e 89 estas revelam que a junta de união gerada pela ferramenta SFL apresenta porosidade. Estes resultados permitem assumir que o processo de SFL que se destaca por ser autogénio pode carecer de material adicional. A qualidade do cordão de soldadura, demonstra que a qualidade do fluxo de material “visco plástico” foi insuficiente, o fluxo efectivamente ocorreu e verifica-se que a qualidade do nugget apresenta alguma porosidade atribuindo uma qualidade insuficiente.

Como comentário final na discussão dos resultados e em complemento ao resultado da força de forjamento durante o processo SFL verificado na Figura 90, o processo SFL não é possível sem que haja um mínimo de densificação comprovada capaz de resistir à força de Forjamento Vertical. A Figura 92 apresenta um ensaio adicional que confirmou a necessidade de um tratamento de pré densificação na espuma anterior ao processo SFL.



Fig 92 Ensaio SFL de Espumas por esmagar na tipologia LAP PENETRATION.

Esta figura apresenta a tipologia LAP PENATRATION na forma dissimilar em termos de material, discutida na revisão teórica pela Figura 56 ou por outras palavras a sobreposição de uma chapa de alumínio de 1mm de espessura da série AA1000 no estado O e a espuma metálica no seu estado natural, a chapa é de uma liga ideal para o processo SFL por ser macia onde é fácil fomentar o fluxo de material “visco plástico”. Este ensaio revelou-se impossível de realizar. No lado esquerdo superior da figura está a chapa de topo superior e no lado esquerdo inferior da figura o topo inferior da chapa. No lado direito superior e inferior da figura surge a espuma, e que apresenta uma deformação resultante da passagem da ferramenta SFL na chapa, e a face de contacto com a chapa deformou-se deformando consequentemente a espuma sem que a ferramenta conseguisse perfurar a chapa. Esta é mais uma prova da necessidade do aumento da densidade da espuma para que se possam determinar parâmetros operatórios de SFL.

5.3 - Resultados do ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza efectuados sobre as juntas soldadas apresentados na Figura 93 não foram totalmente conclusivos uma vez que frequentemente as impressões iniciavam fissuras eventualmente devido ao material poroso subjacente como se ilustra na figura 94 na indentação 1. Estas impressões 1 e 4 não são valorizadas contudo não retiradas e apresentadas, apenas os valores dos ensaios 2 e 3 em que as impressões eram regulares (Figuras 94 e 95) serão de interesse. A dureza medida variou entre 626 e 705 HV.



Fig.93 Micrografia (ampliação 50x) do provete do cordão de SFL.

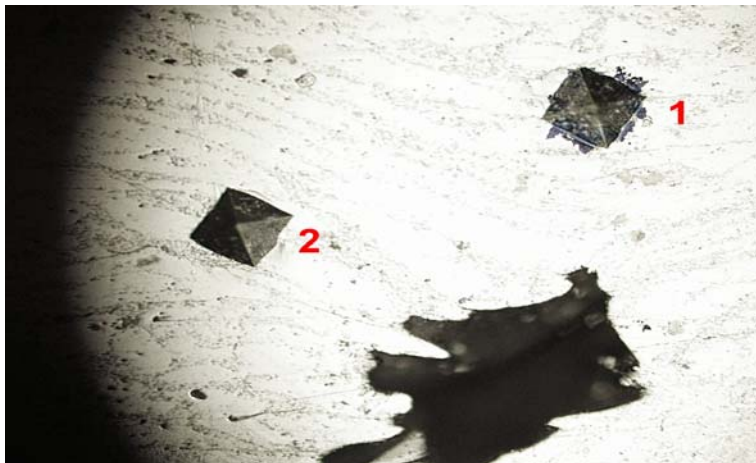


Fig.94 Micrografia (ampliação 200X) dos ensaios de dureza 1 e 2.



Fig.95 Micrografia (ampliação 200X) dos ensaios de dureza 3 e 4.

A tabela 10 apresenta os valores medidos.

Tabela 10 Resultados dos ensaios de dureza válidos

Ensaio	d1 (mm)	d2 (mm)	d _{Med} (mm)	HV (N)
1	0,12	0,122	0,121	620
2	0,12062	0,1201	0,1204	626
3	0,11364	0,11329	0,1135	705
4	0,12454	0,12996	0,1273	560

5.4 - Soldadura MIG

As Figuras 96 e 97 ilustram uma ligação efectuada por fusão com o processo MIG com material de adição. De notar que existe a formação de uma grande quantidade de poros quer na zona fundida quer na zona afectada. Este processo poderá constituir uma alternativa para baixas espessuras em que a soldadura se possa fazer numa só passagem.

A velocidade de alimentação do fio foi de 3,2 m/min. A intensidade de corrente média e a tensão foram de 36A e de 19,8V, respectivamente. Como protecção gasosa usou-se argon com um débito de 15l/min.



Fig.96 Provete soldado por MIG vista de topo.

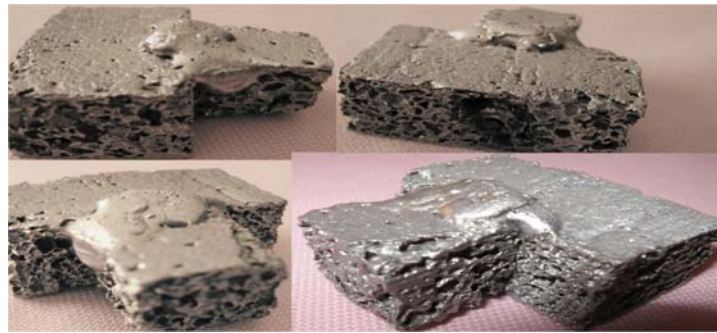


Fig. 97 Provete soldado por MIG de diversas vistas.

Foi verificado nos ensaios efectuados que o escorvamento do arco queimou a espuma o que constitui um obstáculo adicional que pode ser minimizado iniciando a soldadura fora da espuma.

A muito pequena dimensão dos provetes impediu testar esta hipótese. A Figura 98 apresenta os danos que um escorvamento accidental, pode causar na espuma metálica. A densidade do material da espuma é baixa e com uma descarga accidental na zona porosa mais exposta como se verifica na Figura 98 poderá inviabilizar este processo de ligação, ou seja, a zona da espuma com os poros plenamente expostos, destaca-se por ser um ponto fraco para danos estruturais importantes nas espumas que possam ocorrer.

No sentido de minimizar eventuais danos resultantes do arco, este poderá ser iniciado:

A - Fora da espuma,

B - Por meio indirecto do escorvamento com auxílio de uma ponta metálica do mesmo material da espuma ou de uma ponta do fio de adição,

C - Iniciar o escorvamento em zonas mais densas da espuma.

Desta forma poderá ser possível minimizar danos estruturais na espuma, causados pelas elevadas temperaturas libertadas no escorvamento do arco eléctrico, até que o arco se acenda e estabilize.



Fig. 98 Dano resultante do escorvamento.do arco

6. Conclusões e Sugestões para trabalho futuro

O objectivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de unir Espumas Metálicas em AA6061. para isso testaram-se SFL e MIG.

Para isso começou por se desenvolver um sistema de fixação adaptado ao equipamento de SFL do DEM-IST que permitiu reduzir o tempo de posicionamento para soldadura de provetes de pequena dimensão.

Do trabalho realizado pode concluir-se que:

- É possível ligar uma espuma de poro fechado constituída pela liga AA6061 fabricada pelo método de pulverotecnologia por SFL em modo de controlo de posição.
- A ligação por SFL requer uma preparação mecânica prévia da espuma que consiste numa compactação.
- Para uma densidade relativa superior a 0,77 a ligação apresenta melhor qualidade na zona do nugget, nomeadamente maior uniformidade e continuidade de material.
- A liga AA6061 da espuma de poro fechado usada neste trabalho não é a mais adequada para a ligação por SFL devido à dureza que apresenta.
- Foi possível ligar pelo processo MIG a espuma estudada, embora ocorra dano da estrutura devido á temperatura do arco eléctrico e, consequentemente, a integridade estrutural seja baixa. Deve-se iniciar a ligação na superfície da espuma, porquanto é a zona de maior densidade. O escorvamento do arco numa zona de baixa densidade da espuma origina danos significativos na estrutura.

Sugestões para Trabalho Futuro

A SFL parece ser viável na ligação de materiais celulares como os estudados, no entanto seria interessante ensaiar outro tipo de ligas de Al.

Uma segunda vertente de investigação proposta seria explorar outros processos de soldadura como a difusão ou a brasagem.

Bibliografia

- [1] - David C. Curran PhD thesis Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent, St. John's College - University of Cambridge 2003
- [2] - Kathryn A. Dannemann *, James Lankford Jr./ High strain rate compression of closed-cell aluminium foams/Materials Science and Engineering A293 (2000) 157–164
- [3] - Process for Making Foamlike Mass of Metal - United States Patent No. 2,434,775, Benjamin Sosnick, 20th Jan 1948
- [4] - A. Paul, U. Ramamurty/Strain rate sensitivity of a closed-cell aluminum foam/Materials Science and Engineering A281 (2000) 1–7
- [5] - Kenneth Kremer, Anthony Liszkiewicz and James Adkins/DEVELOPMENT OF STEEL FOAM MATERIALS AND STRUCTURES Technology Roadmap Program 9913 Final Report\By Fraunhofer USA – Delaware Center for Manufacturing and Advanced Materials 9 Innovation Way Newark, DE 19711 October 20, 2004
- [6] - COOKSON, EDWARD JAMES. Development of the Metal Foam Electrical Resistance Heater, Master of Science, Faculty of North Carolina State University, Raleigh 2003
- [7] - Effects of heat treatment on compressive properties of AZ91 Mg and SG91A Al foams with open-cell structure by Y. Yamada a,*, K. Shimojima a, Y. Sakaguchi a, M. Mabuchi a, M. Nakamura a, ELSEVIER./T. Asahina a, T. Mukai b, H. Kanahashi c, K. Higashi c
- [8] - T.G. Nieh, K. Higashi, J. Wadsworth / Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminum foams, Materials Science and Engineering A283 (2000) 105–110
- [9] - BRIAN PATRICK NEVILLE; PROCESSING AND DEVELOPMENT OF AN ULTRA-LIGHT, HIGH STRENGTH MATERIAL THROUGH POWDER METALLURGY; PhD Dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University
- [10] - ADRIAN THOMAS O'NEILL Master Thesis DEVELOPMENT OF CLOSED CELL METALLIC FOAM USING CASTING TECHNIQUES To the Graduate Faculty Of North Carolina State University 2004
- [11] - Ciência dos Materiais Sinterização
(<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=22>), consultado em 19/05/08
- [12] - www.carbosint.com/web/html/ing/sinterizzati.htm/ / consultado em 06/06/08
- [13] – Catálogo técnico de Fraunhofer Institute for Manufacturing and Advanced Materials
- [14] - Edward J. Cookson, Donald E. Floyd II, Application of Reticulated Metal Foam to Gas Fired Infrared Burners, Porvair Advanced Materials, Hendersonville, North Carolina 28792,USA

-
- [15] - Christopher Bryant Williams/DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LAYER-BASED ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS FOR THE REALIZATION OF METAL PARTS OF DESIGNED MESOSTRUCTURE PhD Dissertation to Georgia Institute of Technology April 2008
- [16] - Anthony E. Simone, Jr.; The Tensile Strength of Poured Copper Made by the GASAR Process; Master of Science in Civil and Environmental Engineering at Massachusetts Institute of Technology August 1994
- [17] - <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html#authors> (The following article appears in the journal JOM, 52 (12) (2000), pp. 22-27)/ consultado em 03/05/08
- [18] - WASSIM ELIAS AZZI Master thesis : A systematic study on the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications for North Carolina State University MECHANICAL ENGINEERING, Raleigh FALL 2004
- [19] - Cellular Metals Manufacturing By Haydn N. G. Wadley, Advanced Engineering Materials 2002, 4, N°10
- [20] - JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 33 (1998) 1431-1440 "Deformation characteristics of metal foams by J. BANHART, J. BAUMEISTER, Fraunhofer Institute for Applied Materials Research, Lesumer Heerstra e 36, 28717 Bremen, Germany
- [21] - J. BANHART, W. BRINKERS; Fatigue behavior of aluminum foams; JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS 18 (1999) 617-619
- [22] - Ronald E. Miller\A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals\ International Journal of Mechanical Sciences 42 (2000)
- [23] - FOAMINAL Properties Overview and Design Guideline Version 1.4, Fraunhofer IFAM Institute Manufacturing and Advanced Materials
- [24] - SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2000-01-0337, Alulight - Aluminum Foam for Lightweight Construction; SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, March 6-9, 2000 by Frantisek Simancik/Institute of Materials and Machine Mechanics SAS, Walter Rajner/Non Ferrum of America L.P., & Rainhard Laag/Alulight GmbH
- [25] - Wikipedia Surfactante (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Surfactante>) consultado em 25/5/08
- [26] - TALAT Lecture 1410 (Date of issue 1999 by EAA – European Aluminium Association)
- [27] - NPL Workshop on Metal Foams - 22nd March 2000 presentation (NPL-National Physical Laboratory)
- [28] - Dr. James B. Min, Dr. Louis J. Ghosn, Dr. Sai V. Raj, Dr. Bradley A. Lerch, and Frederic A. Holland, Jr.; Vibration Characteristics Determined for Stainless Steel Sandwich Panels With a Metal Foam Core for Lightweight Fan Blade Design / NASA Glenn Research Center
Glenn contact: Dr. James B. Min, 216-433-2587, James.B.Min@nasa.gov
Ohio Aerospace Institute (OAI) contact: Dr. Louis J. Ghosn, 216-433-3822, Louis.J.Ghosn@grc.nasa.gov
Headquarters program office: OAT. Programs/Projects: **Ultra Safe**
-

-
- [29] - Raj, S., V.; Ghosn, L., J.; Lerch, B., A.; Hebsur, M.; Cosgriff, L., M.; Fedor, J.; **REPORT NUMBER** NASA/TM-2007-214926, **TITLE AND SUBTITLE** Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel Foam Panels; Available from:
 NASA Center for Aerospace Information 7115 Standard Drive Hanover, MD 21076–1320
 National Technical Information Service 5285 Port Royal Road Springfield, VA 22161
- [30] - Dennis L. Huff; Noise Reduction Technologies for Turbofan Engines
 NASA/TM—2007-214495/ Glenn Research Center, Cleveland, Ohio
- [31] - J. Banhart and P. Weigand; Powder Metallurgical Process for the Production of Metallic Foams; Fraunhofer-Institute for Applied Materials Research, Bremen, Germany
- [32] – John Banhart; International Journal of Vehicle Design, Version 2; Aluminium foams for lighter vehicles; Hahn-Meitner-Institut Berlin, Germany
- [33] - John Banhart Metal Foams—from Fundamental Research to Applications, Department of Materials Science, Hahn-Meitner-Institut, Berlin, GERMANY/Department of Materials Science, Technical University Berlin, Berlin, GERMANY email: banhart@hmi.de;
 FRONTIERS IN THE DESIGN OF MATERIALS, Baldev Raj, S Ranganathan, K Bhanu Sankara Rao, M D Matthew, P Shankar (Eds), Universities Press (India) Limited, India, 2007.
- [34] –
<http://www.ergaerospace.com/foamproperties/matspecificproperties.htm#CrushStrength>
 consultado em 11/9/08 “Espumas da ERG Materials Aerospace Corporation à compressão”
- [35] - Jerzy Sobczak; Journal of KONES Internal Combustion Engines 2003, vol. 10, 34 HIGH POROSITY MEDIA FOR TRANSPORTATION – SELECTED ASPECTS; Foundry Research Institute, 73 Zakopianska St., 30418
 Cracow, Motor Transport Institute, 80 Jagiellonska St., 03301
 Warsaw
- [36] - Patente ES 2 213 021 T3 de OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS ESPAÑA/ Número de publicación: 2 213 021 / Número de solicitud europea: 00937503 .1 / 86
 Fecha de presentación: 10.03.2000 / 87 Número de publicación de la solicitud: 1078215 / 87
 Fecha de publicación de la solicitud: 28.02.2001
- [37] - Lightweight Energy Absorbers for Blast Containers/NASA Tech Briefs/MFS-31563
 National Aeronautics and Space Administration (NASA)/George C. Marshall Space Flight Center/Marshall Space Flight Center, Alabama 35812
- [38] - Dr. Ing. F. Šimančík, Dr. Ing. J. Jerz, Dr. Ing. J. Kováčik; Aluminium foam - a new light weight structural material; Ing. P. Minár, Institute of Materials and Machine Mechanics, SAS, Račianska 75, P.O. Box 95, 830 08 Bratislava 38, Slovak Republic
- [39] - R. Chen, T.S. Zhao; Porous current collectors for passive direct methanol fuel cells
 Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China; Electrochimica Acta 52 (2007) 4317–4324 (ScienceDirect-Elsevier)
-

[40] - Srikanth Arisetty, Ajay K. Prasad, Suresh G. Advani; Metal foams as flow field and gas diffusion layer in direct methanol fuel cells; Fuel Cell Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA; Journal of Power Sources 165 (2007) 49–57 (ScienceDirect-Elsevier)

[41] - Atul Kumar and Ramana G. Reddy; Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with Metal Foam in the Gas Flow-Field of Bipolar/End Plates; Department of Metallurgical and Materials Engineering.

The University of Alabama, P.O. Box 870202, Tuscaloosa, AL 35487, U.S.A.; Journal of New Materials for Electrochemical Systems 6, 231-236 (2003)

© J. New. Mat. Electrochem. Systems

[42] - R. Chen, T.S. Zhao; A novel electrode architecture for passive direct methanol fuel cells; Electrochemistry Communications 9 (2007) 718–724; Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong SAR, China

[43] - Kazuki OKUNO, Masahiro KATOH, Keizo HARADA, Jin-Joo PARK, Masaru YAO, Tsutomu IWAKI, Shigeo TANASE and Tetsuo SAKAI; High-Rate Discharge Properties of Ni-MH Battery Using New Substrates for HEV Applications

SEI TECHNICAL REVIEW · NUMBER 62 · JUNE 2006 · 33

[44] – Doc. técnico comercial Porvair Advanced Materials 700 Shepherd Street Hendersonville, NC 28792 (www.porvairmetalf Foam.com), **Metpore EFCS**

[45] - Youngil Jeong Hongsuk Kim, Gyubeck Cho; DPF Promotion Program and Associated Technologies in Korea; Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM) Center for Environmentally Friendly Vehicle (CEFV); (International Conference on Transport and Environment-Milan, Italy 19-21 March 2007)

[46] - David P. Haack¹, Kenneth R. Butcher¹, T. Kim² and T. J. Lu²; Novel Lightweight Metal Foam Heat Exchangers.

¹Porvair Fuel Cell Technology, Inc., 700 Shepherd St., Hendersonville, NC 28792, USA

²Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge, UK

Relatório técnico retirado de:

<http://www.porvairadvancedmaterials.com/papers/Mech%20Engineer%20Congress%20Paper.pdf>, consultado e retirado a 10/10/08

[47] - K. Boomsma a), D. Poulikakos a), F. Zwick b); Metal foams as compact high performance heat exchangers; a) Laboratory of Thermodynamics in Emerging Technologies, Institute of Energy Technology, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Center, ML J 36, 8092 Zurich, Switzerland

b) ABB Corporate Research Ltd., Segelhof, 5405 Baden-D attwil, Switzerland; (ScienceDirect-Elsevier)

-
- [48] - Burhan Ozmat, Principal, OZER Advanced Technologies; artigo jornalístico "Reticulated Metal Foams Build Better Heatsinks"; Voorheesville, N.Y.; Power Electronics Technology November 2007
- [49] - K. Wang *, Y.L. Ju, X.S. Lu, A.Z. Gu; On the performance of copper foaming metal in the heat exchangers of pulse tube refrigerator; Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Huashan Road, Shanghai 200030, PR China; (ScienceDirect-Elsevier)
- [50] - Documento informativo, m.pore GmbH Enderstrasse 94(G), 01277 Dresden 0049 351 2502290, info@m-pore.de (http://www.m-pore.de/Vortrag_SanSeb06.pdf) retirado e consultado a 10/10/08
- [51] - www.ultramet.com/propulsionsystem_components_liquid_rocket.html, consultado em 17/09/08
- [52] - Prof. Dr.-Ing. Mirosław Weclas; Strategy for intelligent Internal Combustion engine with homogeneous combustion in cylinder Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) Fachbereich Maschinenbau der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg Keßlerplatz 12 90489 Nürnberg
mirosław.weclas@fh-nuernberg.de
ISSN 1616-0762 Sonderdruck Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg Nr. 26, April 2004
- [53] - Prof. Dr.-Ing. Mirosław Weclas; Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engines; Institut für Fahrzeugtechnik
Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg
Keßlerplatz 12
D-90489 Nürnberg;~
ISSN 1616-0762 Sonderdruck Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg Nr. 32
- [54] - Wolfgang Kaltner; Hollow sphere structures for the emission limitation of internal combustion engines; Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Chemie der Technischen Universität München; zur Erlangung des akademischen Grades eines, Doktors der Naturwissenschaften (Dr.rer.nat.). Die Dissertation wurde am 14.05.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Chemie am 18.06.2008 angenommen.
- [55] – Doc. técnico comercial Porvair Advanced Materials 700 Shepherd Street Hendersonville, NC 28792 (www.porvairmetalf foam.com), **MetaflameA**, **MetaflamePB**, **MetaflamePB10**
- [56] - T. J. Lu Audrey Hess, and M. F. Ashby; Sound absorption in metallic foams; Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, United Kingdom; JOURNAL OF APPLIED PHYSICS; VOLUME 85, NUMBER 11 1 JUNE 1999
-

-
- [57] - L. Catarinucci, O. Losito, L. Tarricone, Metal Foams for EM Shielding Applications, DII University of Lecce, Via Monteroni 73100 Lecce-Italy, e-mail: luciano.tarricone@unile.it; MIUR/Regione-Puglia POR 2002-2006 (Project ID Number: PE_091)
- [58] - L. Catarinucci, O. Losito, L. Tarricone, High Added-Value EM Shielding by Using Metal-Foams: Experimental and Numerical Characterization; Dip. Ingegneria dell'Innovazione University of Lecce Italy; F. Pagliara, ITEL Telecomunicazioni s.r.l. Ruvo di Puglia (BA) Italy MIUR/Regione-Puglia POR 2002-2006 (Project ID Number: PE_091)
- [59] - http://www.nrc-cnrc.gc.ca/highlights/2008/0807titanium_e.html, consultado em 10/10/08
- [60] – International Patent Classification: B23K 20/12, International Publication N° WO99/52699 (World Intellectual Property Organization-PCT (Patent Cooperation Treaty))
- [61] - Martin Josef Greitmann, Peter Deimel; FRICTION STIR WELDING – INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR JOINING ALUMINIUM COMPONENTS; Otto-Graf-Journal Vol. 16, 2005
- [62] - Friction Stir Welding of Advanced Materials: Challenges (S.A. David and Z. Feng Metals and Ceramics Division Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, TN 37831)
- [63] – Vilaça da Silva, Pedro Miguel dos Santos - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SOLDADURA POR FRICÇÃO LINEAR– ANÁLISE EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO ANALÍTICA –Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO 2003
- [64] - Method of repairing a crack in a component utilizing stir welding; EUROPEAN PATENT SPECIFICATION, EP 1 413 384 B1
- [65] - Crack repair using Friction Stir Welding on materials including metal matrix composites, Ferrous Alloys, non-ferrous alloys, and superalloys, United States Patent (Packer et al) US 7225968 B2, date of patent 05/06/07
- [66] - Kevin J. Colligan; Friction Stir Welding For Ship Constructio; Concurrent Technologies Corporation 441 Friendship Road, Suite 103, Harrisburg, PA 17111-1204
Phone: 717-565-4405 • Fax: 717-565-4420
e-mail: piastred@ctc.com
- This article was prepared by the Navy Metalworking Center, operated by Concurrent Technologies Corporation (CTC), under Contract No. N0014-06-D-0048 to the Office of Naval Research as part of the Navy ManTech Program. Approved for public release; distribution is unlimited.
- [67] - Mats Ericsson, Fatigue Strength of Friction Stir Welded Joints in Aluminium PhD Thesis, Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden ISBN 91-7178-001-7, ISRN KTH/MSE-05/07 SE MAT/AVH Stockholm 2005 (KTH Industrial Engineering and Management)
-

[68] –

http://forums.sae.org/access/dispatch.cgi/stirweld_pf/docProfile/100014/d20040615183359/No/2004-SAE-FSW-Albuquerque-Pan.pdf, consultado em 10/10/08

[69] - Cottrell, A. H, Introdução à Metalurgia, 2ª Edição, Fundação Calouste Gulbenkian, 1975, pp.283-303, 527, 568, 580-581.

[70] – Barrali, Jean; Maeder, Gérard, Prontuário de Metalurgia elaboração, estruturas-propriedades e normalização, Fundação Calouste Gulbenkian ISBN 972-31-1106-3, pp 23, 132

[71] – Ferreira, Filipe Miguel, Processamento por Fricção Linear, Tese de Mestrado UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO 2008

[72]<http://www.aluminum.org/AM/Template.cfm?Section=Home&template=/CM/HTMLDisplay.cfm&ContentID=18667>, consultado a 21/10/08 site oficial The Aluminum Association

[73] - Aluminum Alloy Selection and Applications, The Aluminum Association, Inc., 900 19th Street, N.W., Suite 300, Washington, D.C. 20006, (202) 862-5100, December, 1998

[74] – Anderson, Tony (Corporate Technical Training Manager for ESAB North America, tanderson@esab.com), publicação informativa - Understanding the Aluminum Alloy Designation System - em:

<http://www.alcotec.com/us/en/solutions/-Understanding-the-Aluminum-Alloy-Designation-System.cfm>, consultado a 21/10/08 site oficial da ALCOTEC.

[75] - Introduction to the Unified Numbering System of Nonferrous Metals and Alloys, artigo publicado em : <http://www.key-to-metals.com/Article81.htm>, consultado a 21/10/08, site oficial da Key to Metals

Anexo 1

